

# xvz

Éditée par l'  
Association  
Française de  
Topographie  
n°103

- topographie
- géodésie
- photogrammétrie
- SIG
- géomatique
- métrologie
- hydrographie
- topométrie
- cartographie
- génie civil
- histoire



## Photogrammétrie et archéologie sous-marine profonde



**Directeur des publications**

André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP

**Directeur adjoint des publications**

Emmanuel Natchitz  
Enseignant Chercheur ESTP

**Rédaction et administration XYZ**

2 avenue Pasteur  
94165 Saint Mandé CEDEX  
Tél. : 01 43 98 84 80  
Fax : 01 43 74 72 80  
secrétariat: tous les jours de 9 h à 17 h

**Rédacteur en chef**

Jean-Pierre Maillard  
Urbaniste, Géomètre Expert Foncier,  
Marne la Vallée

**Comité de Rédaction**

Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités  
INSA de Strasbourg

Tania Landes  
Maître de Conférences  
INSA de Strasbourg

Stéphane Durand  
Enseignant chercheur  
ESGT Le Mans

**Responsable du site internet**

Tania Landes

**Publicité**

Chantal Holdrinet  
aft78@wanadoo.fr  
Tél. : 01 39 53 98 93

**Conception et maquette**

Dorothée Picard

**Abonnements:** Evelyne Mesnis

**Autre publication:** L'annuaire de l'AFT

**IMPRIMERIE MODERNE USHA**

137 avenue de Conthe  
BP 337 15003 Aurillac CEDEX  
Tél. : 04 71 63 44 60 - Fax:  
04 71 64 09 09

**Dépôt légal**

2<sup>e</sup> trimestre 2005 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP: 0106 G 80866

**Tirage de ce numéro:** 1600 ex

**Abonnement annuel**

France CEE: 73 €  
Étranger (avion, frais compris): 76 €  
Les règlements payés par chèques  
payables sur une banque située hors de  
France doivent être majorés de 10 €  
le numéro: 20 €  
Le bulletin d'adhésion est en p. 79  
Membre du SPCS Syndicat de la Presse  
Culturelle et Scientifique

L'AFT n'est pas responsable des opinions  
émises dans les conférences qu'elle organise  
ou les articles qu'elle publie. Tous droits de  
reproduction ou d'adaptation strictement  
réservés.

Juin 2005 • 2<sup>e</sup> trimestre

# Sommaire

## La revue XYZ est éditée par l'AFT Association Française de Topographie

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)   
2 avenue Pasteur - 94165 Saint Mandé CEDEX - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 43 74 72 80

E-mail: [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) • Site internet: <http://www.aftopo.org>

### ■ Editorial ..... 5

### ■ Info-Topo

- > Les informations de la profession ..... 7
- > L'axe de la Terre a-t-il tremblé ? ..... 14

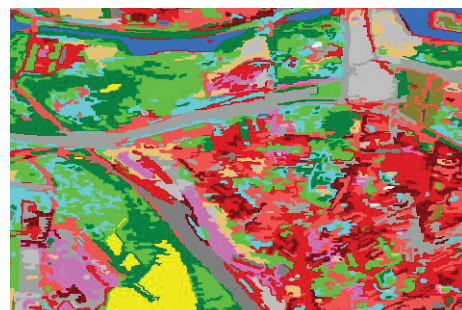
### ■ Manifestation

- > Les Journées de la Topographie 2005  
sous la bonne étoile européenne  
du 21 au 23 septembre 2005 ..... 15
- > 3<sup>e</sup> assemblée générale du réseau  
thématique européen EEGECS Dublin,  
22-23 avril 2005 ..... 16
- > FIG : "Ahlan Wassalan fel Qaera" ..... 17

### ■ Photogrammétrie

- > Photogrammétrie et archéologie sous-marine  
profonde - Le cas de l'épave étrusque Grand  
Ribaud F  
*Pierre DRAP - Luc LONG* ..... 19

### ■ Télédétection



- > Télédétection et photogrammétrie,  
chaînon dans la détermination  
du climat urbain à Strasbourg  
*Tania LANDES - Pierre GRUSSENMEYER*  
- *Georges NAJJAR* ..... 27

### ■ Le 1<sup>er</sup> Forum de l'AFT



- > Le 1<sup>er</sup> Forum de Topométrie le 17 mars 2005 :  
GPS et stations totales  
*Michel KASSER* ..... 35

- > Technique de lever par véhicule équipé de  
récepteurs GPS et d'une station totale  
*Hervé GONTRAN* ..... 37



- > Surveillance à Amsterdam  
*Thierry PERSON - Martin BETH* ..... 41
- > Utilisation de plusieurs techniques  
de mesure pour enrichir une méthodologie  
*Alain MARTIN-RABAUD* ..... 44
- > L'intégration complète du GPS et  
d'un tachéomètre : le SmartStation  
de Leica ..... 48
- > Stations Totales Optiques et GPS : la  
"Topographie Intégrée" chez Trimble  
*Jean-François CABANEL* ..... 49

### ■ Géomatique

- > Vers une Géomatique participative  
*Stéphane ROCHE* ..... 51

### ■ Histoire

- > Sciences géographiques dans la Haute Antiquité  
*Jean BOURGOIN* ..... 55
- > Le temps des premières longitudes (2/3)  
*Frédéric BRETAR* ..... 65

### ■ GSF

- > A Madagascar ce ne sont pas les Dieux qui  
tombent sur la tête... mais les géomètres !  
*Henri de SAINT-SERNIN* ..... 73



### ■ Art et Géométrie

- > Bernard Delagrange :  
les éclats  
de la sphère  
*Jean-Pierre  
MAILLARD* ..... 74

### ■ Livres ..... 76

Pour la recherche de nos annonceurs  
consulter la page 76.

*Comme annoncé dans le n°102 Emmanuel Natchitz, rédacteur en chef d'xyz depuis presque cinq ans, a passé la main. Qu'il soit remercié pour sa contribution désintéressée et sa disponibilité sans compter. Il rejoint donc le club des anciens responsables de la revue dont il faut aussi resaluer l'engagement au service de l'expression écrite de l'AFT depuis l'origine et rappeler les noms : Louis Catinot, Jean Puycouyol, Robert Vincent, Michel Sautreau, André Bailly et Robert Chevalier.*

*A l'époque de ces derniers, la revue se confectionnait à la colle et aux ciseaux ce qui rend leur mérite encore plus considérable aux yeux de leurs successeurs aujourd'hui bénéficiaires de la PAO et de l'Internet...*

*Le Conseil d'administration de l'AFT de février dernier m'a appelé à prendre la relève. Je ne me doutais pas que la rubrique "Art et Géométrie" dont je me charge depuis près de vingt numéros puisse me conduire un jour à cette nouvelle responsabilité. En harmonie avec les membres du comité de rédaction et ceux du comité de lecture je compte suivre la trace ouverte par mes prédécesseurs visant à la réalisation d'une publication scientifique de qualité, traitant des domaines topomatiques diversifiés, au service de la langue française. Ces comités ne sont pas figés, leurs portes sont ouvertes, c'est le propre du mouvement associatif.*

*Ce numéro rend largement compte du Premier forum de la topographie organisé par l'AFT le 17 mars 2005 à Marne-la-Vallée, manifestation accueillie dans les locaux de l'ENSG. Il constitue le prolongement écrit de cette journée d'étude sur le thème de "Intégration GPS et Stations totales", les actes du forum en quelque sorte. Fort du succès de cette initiative, l'an prochain l'AFT entend organiser le Deuxième forum pour qu'il devienne le rendez-vous professionnel de la topographie du printemps.*

*Xyz nous emmène aussi en eaux profondes pour analyser la photogrammétrie spécialisée au service de l'archéologie sous-marine, une façon discrète de saluer l'année Jules Verne. Comme cela se produit maintenant plus souvent le texte proposé se trouve trop long pour être publié en une seule fois, sauf à déséquilibrer la présentation de la revue ce qui n'est pas souhaitable. Nous remercions donc les auteurs concernés de leur compréhension lorsque nous les invitons à transformer quelquefois leurs articles en un quasi-feuilleton. En revanche, puissent les lecteurs avoir le plaisir et l'impatience de l'attente du numéro suivant pour connaître la fin du sujet.*

*Je renvoie au sommaire, bien fourni, la découverte des autres thèmes tout aussi intéressants. Rendez-vous au prochain numéro.*

**Jean-Pierre Maillard**

# Photogrammétrie et archéologie sous-marine profonde

## Le cas de l'épave étrusque Grand Ribaud F

■ Pierre DRAP - Luc LONG

*Cet article concerne le relevé et la représentation du patrimoine archéologique sous-marin. Le procédé est fondé sur un outil de photogrammétrie piloté par un Système Expert utilisant une base de connaissance issue de l'expertise archéologique. Le relevé s'appuie donc sur la notion de modèle tant géométrique que cognitif et produit une représentation tridimensionnelle du site qu'aucun archéologue, soumis aux contraintes de la plongée profonde, n'avait pu observer par ses propres moyens. Cette approche a été testée avec succès sur la fouille de l'épave étrusque Grand Ribaud F, au large de la presqu'île de Giens (Hyères, Var, France). L'importance archéologique du site et sa grande quantité d'amphores ont été des facteurs déterminants dans le choix de l'épave comme terrain d'expérimentation. Au-delà du relevé et de la représentation du site, nous nous sommes intéressés à la persistance des données au travers d'un formalisme XML et à l'accès à ces données depuis les représentations géométriques générées, 2D et 3D. Un site Internet permet de consulter l'état d'avancement de ce projet et les derniers résultats archéologiques (<http://GrandRibaudF.gamsau.archi.fr>).*

### ■ mots clés

Photogrammétrie sous-marine, Système expert, Archéologie sous-marine, Amphores étrusques, Base de données archéologique, Système d'Information Géographique, VRML, X3D, SVG, Java.

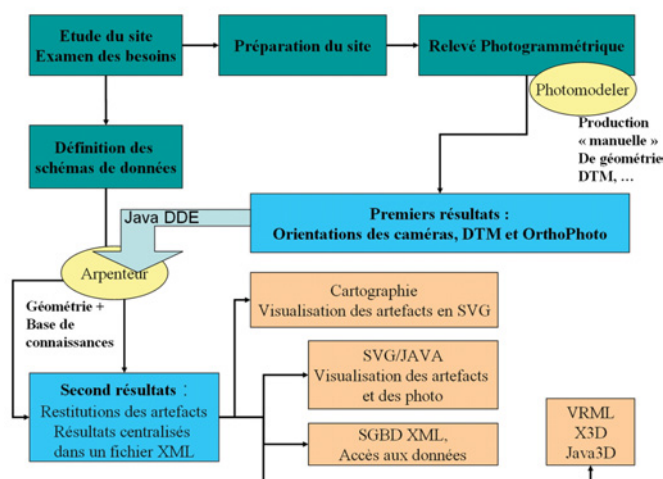
### Introduction

Ce projet touche au problème du relevé et de la documentation archéologique ainsi qu'à celui de la réalisation d'un modèle 3D de l'état de l'épave étrusque *Grand Ribaud F* tout au long des différentes phases de la fouille. La première étape, l'acquisition des données, comprend deux temps : l'analyse préalable des besoins et la définition des procédures. La collaboration étroite avec les experts du domaine considéré, les archéologues, permet de définir leurs besoins spécifiques, comme le corpus des objets à mesurer, les différents types de données auxquels ils seront liés, mais aussi de définir quel sera l'utilisateur final. Cette phase donne lieu à des développements informatiques particuliers pour rendre compte des spécificités du corpus étudié (élaboration de modèles théoriques, de mécanismes de valeurs par défaut, de règles de mesure, etc...).

Dans un second temps, la campagne de mesure, puis la génération de données 3D à partir des outils de photogrammétrie standard, ici Photomodeler de Eos<sup>1</sup> produit de la géométrie classique avec des résultats à présent courants tel que DTM ou orthophoto. S'appuyant sur le résultat des orientations obtenues avec Photomodeler, la dernière phase de mesure photogramétrique se fait avec l'ARPENTEUR, logiciel développé au MAP depuis 1999. La génération de données 3D est alors conduite par des experts du domaine concerné (archéologues, biologistes, architectes, ...) et produit de la géométrie

liée à des connaissances spécifiques du domaine étudié. Ce compte-rendu est scindé en deux articles distincts. Le premier fait état ici des problèmes posés à l'archéologue et de ses besoins en matière de reconstruction 3D, tandis que le second traitera de la photogrammétrie et de ses apports dans l'étude d'une épave profonde.

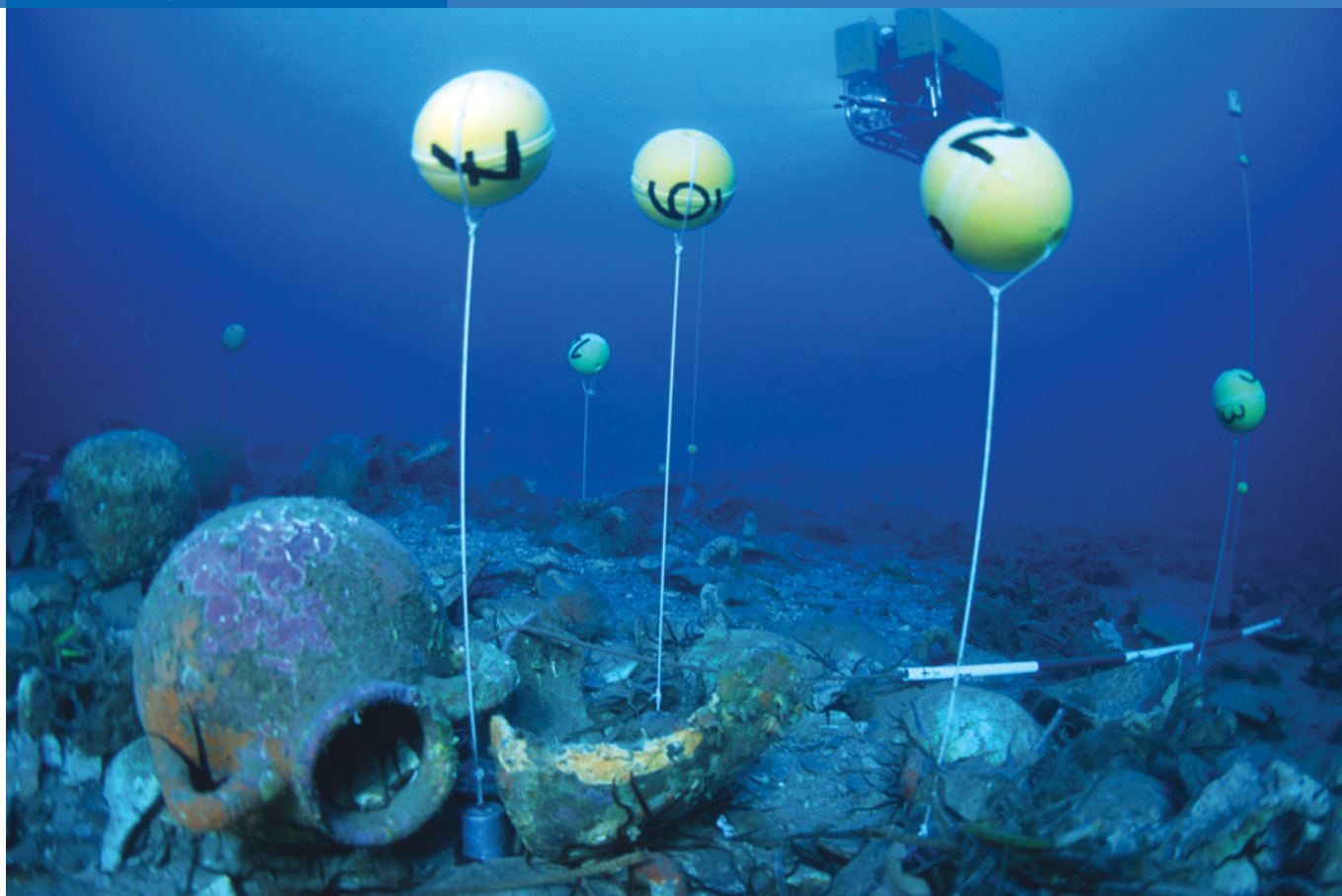
L'outil de photogrammétrie numérique, l'ARPENTEUR, est fondé sur l'idée d'un processus de mesure guidé par la connaissance liée au domaine étudié. En archéologie comme



**Schéma synoptique du processus de mesure.**  
Depuis l'analyse jusqu'à la publication des résultats.

(1) Eos Systems Inc. <http://www.photomodeler.com/>





**Vue du site avant la première prise de vue en Août 2000. Sur la photo de gauche, on peut voir le ROV super Achille, sur la photo de droite les submersibles de la Rémora 2000 de la Comex en phase de prélèvement des amphores à l'aide d'un système de ventouse.**

■ ■ ■ en architecture, le but est de permettre à l'expert (l'archéologue ou l'architecte) d'utiliser son expérience et ses connaissances du milieu et des objets dès la phase de mesure. Le dernier développement du projet qui est présenté ici fusionne des données mesurées à un modèle théorique afin d'obtenir une représentation complète d'un objet partiellement mesuré. Le projet a été expérimenté sur une fouille archéologique sous-marine : l'épave étrusque profonde *Grand Ribaud F* découverte en 1999 au large de Hyères, France. L'épave est d'un grand intérêt archéologique par sa chronologie, qui la situe en pleine période archaïque, par l'importance de sa cargaison et par son excellent état de conservation. La gestion de données est l'un des problèmes majeurs d'une fouille archéologique. Elle se heurte à plusieurs types d'obstacles :

- Les données manipulées sont fortement hétérogènes (outre l'aspect multimédia important, l'utilisation de technologies diverses et sophistiquées accroît les difficultés de gestion, de présentation et d'analyse),
- Plusieurs acteurs sont susceptibles de vouloir les consulter simultanément, voire de les réviser,
- Ces données sont susceptibles d'évoluer au cours du temps (mises à jour, détection d'erreurs d'interprétation, modification des hypothèses de modélisation).

A l'issue de la présentation du projet, de celle du site archéologique, et d'une brève introduction des systèmes de gestion d'information en archéologie comme des divers outils à notre



disposition, nous aborderons l'aspect photogrammétrique, scindé en deux phases distinctes. Ce sera d'abord le cas du relevé "traditionnel" avec Photomodeler, puis des objets manufacturés, élaborés selon un modèle *a priori* géométrique. Évidente pour les objets industriels contemporains, cette approche se justifie également pour des productions plus anciennes telles que les amphores étrusques ou romaines. Enfin, nous aborderons les résultats archéologiques et nous accéderons aux données archéologiques à partir de leurs représentations géométriques.

## Le contexte du projet

### ■ L'épave étrusque *Grand Ribaud F* (Giens, Var)

Si les navigateurs étrusques furent parmi les premiers, dès la fin du VII<sup>e</sup> siècle avant J.-C., à construire un réseau d'échanges sur les rivages du Midi gaulois, on ne connaissait que trois

épaves étrusques très pillées en Méditerranée française. La découverte en 1999, par la Comex, sous la houlette d'Henri-Germain Delauze, d'une épave bien conservée, chargée d'amphores étrusques et de marchandises variées, apporte désormais des données nouvelles sur le commerce d'époque archaïque. Le gisement se situe par plus de 60 m de fond, au large de l'îlot du Grand Ribaud (Hyères, Var, France).

Une première expertise, en 2000, et deux sondages, en 2001 et 2002, furent dirigés par le Drassm (Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines, Ministère de la Culture), avec les moyens logistiques de la Comex. Grâce à l'expérience déjà acquise sur des gisements profonds, ces campagnes de fouille ont permis de tester et de valider de nouvelles méthodes, le plus souvent sans plongeur. Il fut notamment procédé à une couverture photogrammétrique des vestiges par robot et sous-marin et à plusieurs sondages profonds au moyen d'un ventilateur.

Ce diagnostic confirme l'importance historique et l'excellent état de conservation de l'épave, chargée sur plusieurs couches d'environ un millier d'amphores, de vases en bronze empilés et de céramiques étrusques et grecques de belle facture.

L'étude du mobilier permet d'avancer quelques hypothèses sur l'origine du chargement. Les amphores appartiennent toutes au type 4 individualisé en Languedoc par F. et M. Py. Dans cette région, l'arrivée massive de ce type d'amphores se situe entre 525 et 520. La plupart des bouchons de liège ont été retrouvés dans les récipients, poussés à l'intérieur par la pression. Des restes de sarments de vigne et les traces d'usure observées sur les amphores attestent qu'elles étaient calées avec du feuillage et solidement arrimées entre elles par des liens. L'examen de la pâte révèle une production homogène, caractéristique de l'Etrurie méridionale. On pense à la région de Caere (Cerveteri), grande cité exportatrice de vin, connue également pour ses ateliers de bronziers, dont le port d'embarquement principal était Pyrgi (Santa Severa).

Les bassins en bronze empilés et les disques à rebord perlé trouvés dans le navire étaient connus en Gaule dans les sépultures riches de la région d'Aix-en-Provence et aux alentours de Lattes.

Quant à la céramique mise au jour lors du dévasage, elle correspond à un complément de fret qui se répartit en trois catégories distinctes. Il s'agit d'abord de vases grecs à vernis noir représentés par des coupes attiques de type Bloesch C, à pied à tige, d'un type légèrement postérieur à celles de l'épave grecque Pointe Lequin 1A (Porquerolles, Var) datée vers 515 avant J.-C. On note également parmi ces productions grecques un askos oriental à "Figures noires" et bandes peintes. Cette vaisselle, qui constitue un excellent "fossile-directeur" pour la période archaïque, situe le naufrage dans le dernier quart du VI<sup>ème</sup> siècle, sans doute aux alentours de 500 avant J.-C.

Un deuxième groupe d'origine étrusque comprend des urnes ovoïdes, une coupe basse de type buccheroïde et trois mortiers dont la pâte est proche de celle des amphores. La dernière catégorie s'apparente à des urnes et des cruches en pâte claire dont l'origine exacte, étrusque ou grecque, n'est pas clairement définie.

Sur l'arrière du navire, le mobilier de bord se composait d'une meule, une pointe de lance en fer, une olpé en pâte claire et d'un petit nombre d'amphores diverses : grecques, massaliètes et étrusques. Ces dernières, différentes de celles du chargement, sont proches du type Py 5. Parmi le groupe d'amphores grecques, l'une d'elle, originaire de Calabre, portait sous la lèvre un nom d'origine étrusque qui désigne vraisemblablement un marin du bord. Du coup, si la présence d'amphores grecques parmi le mobilier de bord pouvait suggérer l'hypothèse d'un bateau grec ou massaliète se livrant à la redistribution de produits étrusques, le fait que l'une de ces amphores porte une signature étrusque paraît plaider en faveur d'un équipage toscan.

Bien conservée sous le chargement, la coque du navire a été explorée au cours de deux sondages profonds, après le démontage de la cargaison. L'un a été implanté au sud-ouest et l'autre à l'est, sur l'extrémité arrière de l'épave, où fut découvert le gouvernail latéral, conservé sur une hauteur de 1,24 m. La caractéristique des membrures et l'abandon partiel de la liaison par ligature au profit de l'assemblage par tenon et mortaise, à l'exception des extrémités du navire, nous renvoie directement à l'épave grecque archaïque *Jules Verne 7*, découverte dans le port de Marseille. Quoi qu'il en soit, l'épave *Grand Ribaud Fs* s'apparente visiblement au plus gros navire connu à ce jour pour la période archaïque.

La comparaison entre le chargement, originaire d'Etrurie méridionale, et le mobilier mis au jour sur le site portuaire de Lattes et sur les oppida de l'arrière-pays désigne logiquement cet horizon barbare comme principale destination du navire. De fait, les cordages qui arrimaient les récipients entre eux sur l'épave, renforcent l'idée d'une masse homogène, unitaire et soigneusement scellée, qui échappe au commerce mixte et à la distribution par relais que sous-entend l'emporion grec.

Les prochains objectifs consistent à réunir la logistique et les financements nécessaires à une fouille globale du site. D'un haut niveau technologique, cette mission posera dans le même temps les bases d'une nouvelle forme d'archéologie sous-marine où le plongeur devra céder sa place aux engins actionnés à distance. Ainsi, sur cette épave exceptionnelle les archéologues tenteront d'asservir les progrès technologiques aux rigoureux impératifs de la recherche scientifique.

### ■ Photogrammétrie sous-marine au service de l'archéologie profonde

Quelques fouilles d'épaves, en France, à des profondeurs accessibles à l'homme, ont donné lieu à des photogrammétriques avec restitutions tridimensionnelles. Ce fut d'abord le cas en 1975 de l'épave d'amphores romaines de la Madrague de Giens, puis en 1986 sur le site Grand Ribaud D, chargé de dolia ([Hesnard, 1988]) et sur celui des blocs de calcaire de Carry-le-Rouet (Long, 1988)).

Mais, par la rapidité de sa mise en place qui évite désormais le recours aux cadres et aux portiques pesants, la photogrammétrie s'est avérée très efficace depuis ces dernières années dans le domaine des gisements profonds. Du coup, profitant de l'expérience acquise depuis près de quinze ans





- sur plusieurs gisements archéologiques qui échappent à la plongée classique à l'air, la fouille de l'épave *Grand Ribaud F* marque par ses propres innovations une étape supplémentaire dans le développement de l'archéologie sous-marine à grande profondeur ([Long 1995 ; 1998]). Nous y avons testé et validé de nouvelles méthodes, même si la hauteur d'eau n'interdisait pas totalement le recours aux plongeurs lorsque la nécessité s'en faisait sentir<sup>2</sup>.

Précisons, au préalable, que la phase de couverture stéréo-photogrammétrique avait déjà été largement développée dans les années 1990, à partir de divers sous-marins utilisant selon le cas des appareils semi-métriques ou des chambres métriques, argentiques. Ce fut notamment le cas en 1993 sur l'épave romaine *Plage d'Arles 4*, par 662 m de fond, puis sur celle du vaisseau *La Lune*, perdu en 1664 par 88 m de fond, au large de Toulon. Enfin, c'est en 1996 que la méthode fut perfectionnée, en baie de Marseille, sur l'épave romaine *Sud-Caveaux 1*, par 64 m de fond [Long 1998]. C'est toutefois en 1964 que le sous-marin *Asherah*, avec le soutien financier de la *National Geographic Society*, avait inauguré en Turquie, par 35 m de fond, les toutes premières prises de vues stéréoscopiques, sur l'épave byzantine *Yassi Ada 2* [Bass 1970 ; Bass, Rosencrantz 1973]. Réalisée aujourd'hui en une seule journée par une équipe bien entraînée, jusqu'à une profondeur qui peut atteindre 6000 m (limite d'intervention du sous-marin Nautil, IFREMER), l'opération consiste d'abord à équiper le site d'un certain nombre d'éléments indispensables au relevé photogrammétrique. Il s'agit d'établir de longueur pour la mise à l'échelle et de flotteurs pour l'orientation du référentiel, sur la verticale.

Sur l'épave *Grand Ribaud F*, le choix de la photographie numérique permettait de valider les prises de vues dès la remontée en surface du sous-marin et d'effectuer des mesures de contrôle le jour même, à bord du bateau. Cette couverture était nécessaire, pour mémoriser l'état de l'épave et permettre l'élaboration d'un plan du site et une reconstruction 3D utilisant conjointement les données observées sur le terrain et les hypothèses archéologiques.

## ■ Les systèmes de gestion de l'information en archéologie

Depuis plusieurs années les Systèmes d'Informations Géographiques sont devenus des outils quasi courants pour les archéologues<sup>3</sup> qui voient dans cette technologie l'alliance entre la grande masse d'informations collectée sur le terrain et la représentation graphique support de l'analyse. ([Barceló, 2000], [Brovelli, 2000], [Lianos, Patias, 1999]) Les représentations graphiques des SIG sont le plus souvent issues du domaine cartographique, c'est-à-dire alliant vecteur, image et symbolologie dans des outils de visualisation 2D. La culture séculaire de lecture des cartes (voir l'ouvrage de Christian Jacob à ce propos, [Jacob, 1992]) est un atout majeur dans l'utilisation des SIG et probablement un des obstacles à la constitution d'un SIG 3D. En effet, outre l'aspect réaliste, la puissance d'un SIG est aussi liée à la représentation cartographique symbolique des données offrant une expression synthétique de l'analyse des données. [Brovelli, 2000]

Si la représentation 2D suffit à rendre compte du travail archéologique en ce qui concerne une échelle urbaine ou plus grande, appliquée à une période dont les traces en élévation sont inexistantes, il n'en est pas de même quand les études sont menées à l'échelle de l'édifice ou dans le cas présent du navire. Le besoin de représentation 3D est alors primordial et la compréhension globale de l'étude passe par ce type de représentation.

## ■ Le projet ARPEUTEUR

ARPEUTEUR (pour ARchitectural PhotogrammEtry Network Tool for EdUcation and Research) est un ensemble d'outils logiciels développés en collaboration avec l'Equipe PAGE à Strasbourg du laboratoire MAP. Ces outils sont basés sur le concept d'utilisation en réseau et s'appuient sur les techniques de communication HTTP et FTP. Des exemples peuvent être consultés sur le site Internet <http://arpenteur.gam-sau.archi.fr>.

Les principales justifications du projet sont les suivantes :

- Comme logiciel pour l'éducation et la recherche, le langage de développement JAVA™ fournit un outil et une technologie permettant à des équipes de travailler sur des sites et des systèmes distincts et distants, un moyen commode de travail et d'échange.
- Comme outil dédié à l'architecture, ARPEUTEUR bénéficie de l'expertise des deux équipes dans les domaines de la photogrammétrie rapprochée et de la représentation des connaissances architecturales.
- Comme outil dédié à la photogrammétrie, ARPEUTEUR est un système simple et doit être classé parmi les systèmes légers de photogrammétrie, légers au sens de sa simplicité d'utilisation et qui ne requiert pas de matériel d'exploitation lourd.

L'intégration de ces objectifs dans un même ensemble s'appuie sur des choix techniques et conceptuels.

Le premier de ces choix consiste à utiliser des images digitales obtenues à l'aide d'appareils de photographie numérique que l'on trouve aujourd'hui dans le commerce et dont certains présentent des caractéristiques suffisantes en ce qui concerne la qualité des images. Ces images numériques offrent également à l'utilisateur des outils de traitement qui automatisent certaines des tâches habituellement réalisées par un opérateur humain. Enfin, elles permettent l'intégration totale de la chaîne de traitement depuis les

(2) Avec les équipages de L'Archéonaute (Drassm) et du Minibex (Comex), les plongeurs qui se sont succédés sur l'ensemble des trois opérations étaient (par ordre alphabétique) : F. Basse-mayousse, O. Benslimane, J.-C. Cayol, C. Chary, N. Cler, X. Coquoz, G. Dauphin, H.-G. Delauze, A. Del'homme, J.-D. Ferré, S. Fontaine, E. Gottwalles, J. Gory, N. Gilbert, P. Giustiniani, R. Graille, P. Grandjean, S. Greck, A. Grousset, O. Hulot, J.-P. Joncheray, P. Lauric, L. Leru, L. Long (chef de mission), D. Mageaud, S. Marlier, C. Marshal, J.-M. Mazier, S. Mercier, P. et S. Périno, Popof Tcherniomordick, J. Ramone, M. Rival, N. Rouers, G. Savon, M. Tavernier, J. Toulet, L. Vanrell, J.-L. Verdier, B. Vicens et Jo Vicente. D. Bourgal, J. Crawford, P. Drap, C. Lima, P. Nérhot et N. Vincent.

(3) Un grand nombre de recherches est mené dans cette direction, comme en témoigne le travail de l'UISPP qui en 1996 consacra son XIII<sup>e</sup> congrès à ce problème : "Archaeological Applications of GIS", XIII<sup>e</sup> congrès de l'UISPP à Forlì, Italie, 1996.

photographies jusqu'à certains résultats finaux comme la visualisation en 3 dimensions dans des logiciels de CAO-DAO 3D.

Cette intégration est mise à profit pour servir un autre choix, conceptuel, fondé sur l'idée d'un processus guidé par les connaissances relatives au domaine. Concernant l'architecture aussi bien que l'archéologie, il s'agit de permettre à l'expert du domaine d'exploiter ses connaissances pour produire au mieux un résultat conforme à ses vœux. Le résultat peut se présenter sous la forme de documents de relevé, de fichiers dédiés à la visualisation ou en corpus destiné à une base de données. Pour cela, le système fournit à cet expert un ensemble d'outils lui permettant d'exprimer des hypothèses relatives à son champ d'investigation, hypothèses dont l'utilisation conduit à un allègement du processus de mesurage. Parmi celles-ci, citons par exemple, la création d'un corpus représentant les objets présents dans le champ d'investigation.

Comme bénéfice de ces choix, ARPEUTEUR apparaît comme un outil développé pour des professionnels de l'architecture ou de l'archéologie avec une intervention réduite de l'expert photogrammètre.

L'Arpenteur utilise les connaissances de l'expert tout au long du traitement photogrammétrique, il utilisera donc diverses connaissances afin d'alléger les différentes étapes du processus. Voici rapidement les niveaux de connaissances utilisés en fonction des étapes du procédé photogrammétrique.

- Le premier niveau est géométrique. La connaissance que l'on a des objets étudiés est tout d'abord géométrique, souvent les objets manufacturés peuvent s'approcher par une succession de primitives géométriques. L'arpenteur étant un outil de photogrammétrie, nous nous efforcerons donc de prendre en compte la géométrie des objets, géométrie 3D, et d'en calculer une possible projection perspective sur la photo afin d'anticiper le geste de l'archéologue utilisant l'outil. Ces développements fortement axés sur le calcul géométrique et le traitement d'image sont très prometteurs, ils ont débouché sur le procédé I-Mage (Image processing and Measure Assisted by GEometrical primitive) qui a ouvert les portes aux développements visant à intégrer la photogrammétrie et les techniques de Laser Scanner au sein d'un seul et même outil de relevé [Drap, Grussenmeyer, Curtinot, Seinturier, Gaillard, 2004].
- Le second niveau est encore géométrique avec cependant une composante cognitive importante. Il s'agit d'utiliser la notion de modèle lié aux objets mesurés pour pouvoir compléter un ensemble de mesures. Ces mesures sont incomplètes soit parce que l'objet n'est vu que partiellement, soit parce que l'objet est endommagé lors de la prise de vue. La stratégie de reconstruction de l'objet est déterminée par un système expert qui applique un ensemble de règles faisant partie de la description de l'objet.
- Enfin, le dernier niveau de traitement utilisant les connaissances du domaine est celui de l'analyse et de la présentation des résultats. Un procédé photogrammétrique peut produire une grande quantité de résultats, il convient donc de savoir les organiser, les présenter et les utiliser en les fusionnant à d'autres données. Il s'agit ici

d'utiliser les capacités de la photogrammétrie pour faire un pas vers un système d'information patrimonial, liant les données géo référencées à un ensemble de données préexistantes. Les modèles 3D générés servent ici d'interface vers des bases de données qui peuvent être mises à jour indépendamment du relevé photogrammétrique. La connaissance du domaine est utilisée dans un processus de contrôle de cohérence des données (cohérence spatiale par exemple) et par l'application de règles de fusion et de révision des informations tout au long des fouilles archéologiques.

#### Formats des données

Depuis 2002, les données utilisées et générées par l'arpenteur sont stockées sous forme de fichiers XML. Le langage XML, qui repose sur le principe de marquage, permet de dissocier le contenu de sa description. Ce qui assure une bonne structure à l'information et facilite les échanges et partages de données.

Ainsi, il est possible par exemple d'importer un projet élaboré sous PHOTOMODELER™ et d'en retirer toute l'information nécessaire grâce à une traduction au format XML. On peut donc envisager d'exploiter sur arpenteur un chantier multi-images mis en place sous PHOTOMODELER™.

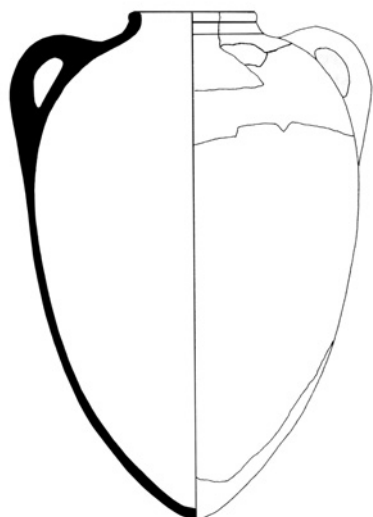
#### ■ L'élaboration d'un corpus spécifique

Le système de gestion documentaire proposé dans ce travail repose sur l'hypothèse de l'existence d'un modèle théorique des objets architecturaux étudiés. Nous pouvons ainsi proposer un modèle théorique depuis les amphores jusqu'aux éléments constitutifs du navire. Ce modèle a pour vocation de décrire d'une part une typologie d'objet, travail qui fut entrepris par exemple dès 1899 par Heinrich Dressel pour la première classification des amphores, et d'autre part un ensemble de relations décrivant le comportement et l'agencement de ces objets entre eux.

#### Typologie des amphores :

Toutes les amphores du chargement, à bord de l'épave, sont d'origine étrusque. Simple emballage perdu fabriqué en série par une main d'œuvre servile, l'amphore commerciale était, dans l'Antiquité, indiscutablement liée au transport maritime et pouvait se retrouver à des milliers d'exemplaires sur un même navire. Si c'est particulièrement le cas pour l'époque romaine, on ne connaissait pas jusque-là, pour la période archaïque, avant le *Grand-Ribaud F*, de navire aussi lourdement chargé d'amphores. Il faut préciser, de manière générale, que les amphores que l'on retrouve sur tout le pourtour de la Méditerranée, ont servi à conditionner en très grande quantité pour un coût modeste les denrées alimentaires de base. C'est le cas du vin, que l'on retrouve notamment dans nos amphores étrusques, mais d'autres produits pouvaient être conservés dans ces récipients en terre cuite : huile, olives, viandes, conserves de poissons, sauces, saumures... Produites pour un seul voyage, les amphores apportent en conséquence une documentation exceptionnelle et donnent l'occasion aux archéologues, amphorologues et historiens, de saisir à travers elles les structures, l'organisation et les pulsations mêmes du commerce et de l'économie antiques.





**Amphore phénicienne d'occident de type P. Cintas 268. A la fin du VIII<sup>e</sup> siècle et au VII<sup>e</sup> siècle avant J.-C., les amphores les plus anciennes de ce groupe sont probablement phéniciennes, tandis que les plus récentes sont étrusques (d'après [Gras 1985], p. 295, fig. 40).**

■ ■ ■ Au VII<sup>e</sup> siècle avant J.-C., les premières amphores étrusques connues, en forme d'obus, furent vraisemblablement inspirées de certaines productions phéniciennes occidentales qui font leur apparition en Etrurie dès les dernières années du VIII<sup>e</sup> siècle. Sur ce point, M. Gras a mis en exergue le type 268 de P. Cintas, qu'il faut sans doute ranger parmi leurs prototypes. Généralement massives, pansues et dépourvues de col, les amphores étrusques sont munies d'une lèvre ou d'un bord en bourrelet et d'anses à profil arrondi. Si F. Benoit, en 1956, identifia le premier ce type d'amphores sur l'épave de la Love, à Antibes, les divers types qui caractérisent cette longue production ont ensuite été individualisés par F. et M. Py, en 1974, dans une étude sur les importations en Vaucluse et à Villevielle (Gard). Onze ans plus tard, M. Gras et M. Slaska, complétèrent cette classification en proposant une typologie des amphores d'Etrurie méridionale. Entre ces deux dates, d'autres chercheurs ont tenté à leur tour d'ordonner les productions étrusques, notamment B. Bouloumié (1980), M. Carduner (1981), G. Marchand, (1982), tandis que plus récemment J.-C. Sourisseau (1997) dressait un bilan synthétique des divers travaux.

Au total, deux séries principales d'amphores étrusques peuvent être isolées : les amphores à fond plat (forme 1-2 et 5) et celles à fond pointu ou bombé, puis taillé, comme sur l'épave (formes 3A, 3B, 4 et 4A). Une bonne partie des formes à fond plat peut être attribuée à la région de Vulci, bien que certaines d'entre elles puissent également provenir de Campanie. Les amphores à fond pointu et bombé, en particulier les formes 3A et 3B, caractéristiques du VI<sup>e</sup> siècle avant J.-C. ont sans doute été produites simultanément dans plusieurs centres bien distincts. Une partie d'entre elles est issue des ateliers de la région de Caere (Cerveteri), alors qu'un autre groupe important provient d'un centre de production encore mal déterminé, peut-être situé dans la vallée de la Fiora, au nord de Vulci.

Pour la période qui nous intéresse, soit la fin du VI<sup>e</sup> siècle et le début du V<sup>e</sup> siècle, les productions à fond pointu (formes 4) semblent bien constituer pour l'essentiel l'évolution des productions de la région de Caere. Celles empilées dans la cale de l'épave *Grand Ribaud F* (type Py 4, ou encore groupe EMD de M. Gras) ([Py M. et F., 1974]), présentent une forme pansue avec un bord en amande collé directement en haut de la panse, qui ne laisse pas de place au col. La base de la lèvre est parfois soulignée d'une strie bien marquée, les anses de section ronde sont massives, le fond en pointe aplatie est "taillé" selon l'expression consacrée. Les quelques quatre cents exemplaires récupérés à ce jour sur l'épave attestent d'une production très standardisée qui provient sans doute du même atelier. Les observations détaillées de la pâte, le plus souvent grise ou rose en fracture, avec une âme grise ou noire ([Long, Drap, Gantès, Rival 2002] page 23), mettent en évidence une fabrication homogène qui se rattache aux types 1 et 6 du groupe 2 de J.-C. Sourisseau, ce qui confirme une origine céretaine ([Sourisseau, 1997] page 53). La couleur varie à l'extérieur du gris au rose, avec de nombreux grains de mica et des nodules oranges. Si cette forme paraît relativement bien normalisée à bord, elle présente néanmoins des variations de capacité qui individualisent plusieurs groupes. L'examen statistique effectué par A. Durand (Map-Gamsau) sur un grand nombre d'individus nuance nos premières estimations, publiées en 2002 ([Long, Drap, Gantès, Rival 2002] page 23). Le groupe principal est compris entre 29 et 33 litres, avec un pic autour de 30 litres. Un deuxième groupe oscille entre 26 et 28 litres tandis qu'aux extrémités se trouvent d'un côté quelques amphores ne dépassant pas 25 litres et de l'autre des contenants volumineux compris entre 35 et 37 litres. La plupart des bouchons de liège, collés à la poix, ont été retrouvés à l'intérieur des récipients, sous l'effet de la pression. Des restes de sarments de vigne et les traces d'usure par frottement, observées dans la terre cuite, attestent qu'elles étaient calées avec du feuillage et arrimées entre elles par des liens.

Du point de vue chronologique, les amphores Py4 apparaissent entre 525 et 500 sur les sites de consommation de l'Hérault et du Gard où elles sont les plus nombreuses ([Py M. et F., 1974]). A Marseille, J.-C. Sourisseau note leur arrivée dès les premières années du V<sup>e</sup> siècle ([Sourisseau, 1997], page 52). Cette forme dont la présence est encore très forte dans le premier quart du V<sup>e</sup> siècle, va décroître rapidement et disparaîtra vers 425, remplacée par le type 4A, à lèvre en bandeau. Largement diffusée entre la Campanie et la Catalogne, cette amphore est attestée sur tout le littoral gaulois avec une concentration particulière, nous l'avons vu, en Languedoc oriental, dans la zone d'influence de Lattes<sup>4</sup>. Un exemplaire utilisé comme objet de bord sur l'épave massaliète Pointe Lequin 1B est daté du deuxième quart du V<sup>e</sup> siècle [Long 1990].

Lors du sondage effectué sur l'épave en 2001, une amphore recueillie à même le bois était encore obturée, mais l'eau de

(4) M. Py, A. M. Adroher Auroux, C. Sanchez, Corpus des céramiques de l'Âge du fer de Lattes (fouilles 1963-1999), Dicocer 2, T1, Lattara 14, Lattes, 2001, p. 24-25.



**A gauche, traces d'usure sur les amphores ; milieu, réalisation expérimentale de l'empilement des amphores. Simulation dans les locaux du DRASSM sur des amphores retirées du site. A droite reconstitution du chargement au Musée d'Histoire de Marseille.**

mer s'était substituée au contenu par des micro fissures. Elle présentait sur la panse une marque peinte à la résine qui s'apparente à une inscription étrusque.

Lors de la mission 2002, le sondage profond implanté à l'aide du ventilateur blaster à l'arrière du navire, au départ de l'étambot, laissait apparaître la fin du chargement. Une trentaine d'amphores Py 4 entières ont été remontées de ce secteur. Le tamisage de ces récipients, en surface, par J. Crawford, a livré des pépins de raisin et de nouveaux fragments de sarments de vigne utilisés pour caler les amphores ([Long, Drap, Gantès, Rival 2002] page 23),

La forme du sondage et les mauvaises conditions de travail à cette profondeur ne facilitaient pas le comptage des couches. Les premières restitutions photogrammétriques de la tranchée opérée jusqu'au bois en 2001, à l'ouest du site, laissent envisager, nous le verrons, l'existence de six couches d'amphores superposées. Ce qui, compte tenu des dimensions du navire, incite à penser que l'épave renfermait au moins un millier d'amphores Py4, soit une charge de l'ordre d'une quarantaine de tonnes.

### **Des relations liant les objets**

#### *Examen du cas d'étude*

Après un examen attentif du mobilier archéologique issu de l'épave, nous avons observé des traces d'usure très nettes sur les anses, sur la lèvre et sur la panse de certaines amphores. Ces traces de frottement confirment qu'une partie au moins des récipients était solidement arrimés par des liens d'environ 6 à 7 mm qui ont entamé l'argile profondément. Du coup, des vérifications faites sur d'autres amphores étrusques recensées dans les dépôts du DRASSM ont mis en évidence des marques similaires qui étaient jusque-là passées inaperçues. Sur les récipients de l'épave, certaines de ces traces d'usure partent de l'anse (très entamée en profondeur) et se poursuivent plus bas sur la panse, indiquant que les amphores du haut étaient parfois attachées à celles de la couche inférieure. Cette remarque nous porte à croire que le chargement était arrimé comme un bloc unitaire et homogène et échappait

ainsi au commerce de redistribution d'un port à l'autre que sous-entend l'emporion grec. Il rappelle plus vraisemblablement le commerce étrusque sur de longues distances, de cité à cité, qui était régi par des traités et des alliances, tel que l'illustre pour le VI<sup>e</sup> siècle avant J.-C. l'épave de la Love à Antibes.

On signalera en outre sur le *Grand Ribaud F* qu'un certain nombre d'amphores présentent un orifice ou un sillon plus ou moins grand, parfois allongé, situé sur le milieu de la panse ou à 13 ou 14 cm en dessous de son diamètre maximal. Cette détérioration se situe très exactement au point de contact et donc de frottement avec la lèvre des amphores inférieures.

Cette constatation qui se vérifie sur les images du sondage où les couches sont encore bien agencées, a pu être mise parfaitement en évidence par ailleurs lors de l'empilement expérimental. Ces traces d'usure nous servaient en même temps de point de calage.

Au-delà de l'intérêt archéologique de telle reconstitution, avec des moyens de fortune ou de réelles visées muséographiques, ces tentatives de reconstruction du chargement mettent en évidence les véritables besoins des archéologues : l'obtention de maquettes tridimensionnelles pour mettre en scènes des hypothèses archéologiques. L'obtention de modèles 3D fidèles à chaque amphore, sa position et son orientation dans le site lors de sa découverte a été notre objectif principal lors de ces diverses campagnes.

Mais nous arrivons ici au terme de la première partie. Nous avons abordé les problèmes posés à l'archéologue désireux de conserver une copie fidèle du site qu'il étudie et qu'il détruit dans le même temps. Nous verrons dans la suite de ce travail comment la photogrammétrie, adaptée au milieu marin, peut générer des représentations tridimensionnelles fidèles qui vont se substituer au gisement et permettre à l'archéologue de poursuivre ses observations dans un milieu créé au plus près du terrain, mais qui n'impose plus d'immersion dangereuse.

A suivre dans XYZ n°104... ●





## ■ ■ ■ Contacts

### Pierre DRAP

MAP UMR CNRS 694, Ecole d'Architecture,  
184 avenue de Luminy, 13288 Marseille Cedex 09, France  
Pierre.Drap@gamsau.archi.fr

### Luc LONG

D.R.A.S.S.M, Département des Recherches Archéologiques  
Subaquatiques et Sous-Marines, Fort Saint-Jean, 13235  
Marseille 02, France  
Luc.Long@culture.gouv.fr

## Références bibliographiques

[Barceló, 2000] Juan A. Barceló – *Visualizing what might be. An introduction to virtual reality techniques in archaeology.* VIRTUAL REALITY IN ARCHAEOLOGY, Edited by Juan A. Barceló, Donald Sanders, Maurizio Forte. Published by Archéopress PO Box 920 Oxford OX27YH, 2000.

[Bass, 1970] Georges F. Bass – “*Archaeology under Water*”, a Pelican Book, Harmondsworth, 1970, 183

[Bass, Rosencrantz 1973] Georges F. Bass, Donald Rosencrantz “*L'utilisation des submersibles pour les recherches et la cartographie photogrammétrique sous-marine. In : L'archéologie subaquatique, une discipline naissante*”, Paris, Unesco, 1973, p. 285-298.

[BonFigli, Guidazzoli, 2000] Maria Elena BonFigli, Antonella Guidazzoli – *A www virtual museum for improving the knowledge of the history of a city* VIRTUAL REALITY IN ARCHAEOLOGY, Edited by Juan A. Barceló, Donald Sanders, Maurizio Forte. Published by Archéopress PO Box 920 Oxford OX27YH, 2000.

[Brovelli, 2000] Maria Antonia Brovelli – *Archeogis: an interoperable model for archaeological data, XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Geoinformation for all, Amsterdam 16-23 July 2000.* Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXXIII, Tome IV-B commission IV, pp 140, 148.

[Drap, Grussenmeyer, Curtinot, Seinturier, Gaillard, 2004] P. Drap, P. Grussenmeyer, P.Y. Curtinot, J. Seinturier, G. Gaillard – “*Presentation of the web based ARPEUTEUR tools: towards a Photogrammetry based Heritage Information System.*”, ISPRS XXth CONGRESS, Turkey, Istanbul, 12-23 July 2004

[Gras, 1985] Michel GRAS : “*Trafics Tyrrhéniens Archaiques*”. BEFAR 258, Rome, 1985. 773 pages.

[Hesnard, 1988] A. Hesnard et al. *L'épave romaine Grand Ribaud D (Hyères, Var)*. Archaeonautica 8 (1988) 55 planches.

[Jacob, 1992] Christian Jacob – *L'empire des cartes. Approche théorique de la cartographie à travers l'histoire*, Bibliothèque Albin Michel, Histoire. Paris, 1992. ISBN 2-226-06083-9.

[Lianos, Patias, 1999] Nikolaos Lianos, Petros Patias – *A virtual underwater archaeological park, ISPRS WG5 and WG2 joint workshop, Photogrammetric measurement, object modelling and documentation in architecture and industry.* Thessaloniki, Greece, 1999. ISBN 960-431-535-8. pp 259, 265.

[Long, 1988] Luc Long – *The Ancient wreck of Carry-le-Rouet : evidence of sea transport of stone in the 2nd or 1st century B.C.* in *Archeology in solution*, proceedings of the Seventeenth annual conference on underwater archaeology, ed. John W. Forster, Sheli O. Smith, Sacramento, 1988, p. 22-27.

[Long, 1990] Luc Long – *Amphores massaliètes, Objets isolés et*

*gisements sous-marins du littoral français méditerranéen*, in *Les amphores grecques de Marseille*, Etudes Massaliètes, 2, 1990;

[Long, 1995] Luc Long – “*Les archéologues au bras de fer. Nouvelle approche de l'archéologie en eau profonde.*” In : *Protection du Patrimoine Archéologique Sous-Marin en Méditerranée*. 100 sites d'intérêt commun méditerranéen. Documents techniques V, AMPHI, Marseille, 1995, p. 14-46.

[Long, 1998] Luc Long – “*L'archéologie sous-marine à grande profondeur : fiction ou réalité.*” In : *Archeologia Subacquea, Come opera l'archeologo sott'acqua, Storia dalle acque, VIII ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia*, Certosa di Pontignano, Siena, 9-15 dicembre 1996, Siena, 1998, 341-379.

[Long, Gantès, Drap 2000] Luc Long, Louis-François Gantes, Pierre Drap – “*Premiers résultats archéologiques sur l'épave Grand Ribaud F (Giens, Var). Quelques éléments nouveaux sur le commerce étrusque en Gaule, vers 500 avant J.-C.*” Dans : *Cahiers d'Archéologie Subaquatique*, 14, 2002, p. 5-40.

[Long, Drap, Gantès, Rival 2002] Luc Long, Pierre Drap, Louis-François Gantes, Michel Rival – “*Presqu'île de Giens, l'épave étrusque Grand Ribaud F.*” Bilan Scientifique du DRASSM, 2001 (2002), p. 74-77.

[Py, 1972] Michel Py – *Les disques perlés en bronze du Languedoc oriental*, in : RSL, 38, 1972, 1, p. 27-61.

[Py M. et F., 1974] François et Michel Py – *Les amphores étrusques de Vaunage et de Villevielle (Gard)*, in : MEFR 86, 1974, 1.

[Py, 1985] Michel Py – *Les amphores étrusques de Gaule Méridionale*, in : *Il commercio etrusco arcaico*, Atti di Roma, 5-7 dicembre 1983, 1985, p.73-94.

[Sourisseau, 1997] Sourisseau J.-Chr. – *Recherches sur les amphores de Provence et de la Basse Vallée du Rhône aux époques archaïque et Classique (fin VII<sup>e</sup>-début IV<sup>e</sup> s. av. J.-C.)*, thèse de doctorat, Aix-en-Provence, 1997.

## ABSTRACT

*This article relates the survey and the representation of the deep underwater archaeological site. The process is founded on a photogrammetric tool controlled by an Expert System using a knowledge base resulting from the archaeological expertise. The survey is thus based on the concept of a geometrical and cognitive model and produces a three-dimensional representation of the site like no archaeologist, subjected to the constraints of the deep diving, had been able to observe himself. This approach was successfully tested on the excavation of the Grand Ribaud F Etruscan wreck, near the peninsula of Giens (Hyères, Var, France). The archaeological importance of the site and its great quantity of amphorae were determining factors in the choice of this wreck as experimentation. Beyond the survey site and its representation we were interested by the data persistence through XML formalism and how these data can be accessed from the resulting geometrical representation, 2D and 3D. An Internet site allows consulting the progress report of this project and the last archaeological results.*  
(<http://GrandRibaudF.gamsau.archi.fr>).

## Télédétection et photogrammétrie, chaînons dans la détermination du climat urbain à Strasbourg

■ Tania LANDES - Pierre GRUSSENMEYER - Georges NAJJAR

*La télédétection spatiale et la photogrammétrie tendent, depuis ces dernières années, à devenir complémentaires et proches tant du point de vue des technologies de capteurs, que du point de vue des traitements géométriques visant à la mesure dans l'image. L'emploi complémentaire des deux techniques se reflète dans des projets tels que le projet RECIUS 3 (Rayonnement et bilan d'Énergie en Climatologie Urbaine à Strasbourg) initié par le LSIIT.*

*Ce projet a pour objectif de modéliser les bilans radiatifs et énergétiques sur la base de données micro-météorologiques, atmosphériques et d'imagerie observées et captées en zone urbaine de Strasbourg. La campagne de mesures sera évoquée avant d'aborder l'intérêt de techniques de photogrammétrie et de télédétection dans un tel projet. Nous développerons plus particulièrement les premiers résultats obtenus par l'utilisation de deux méthodes de classifications visant à fournir une cartographie d'occupation des sols à partir d'images à très hautes résolutions spatiale et spectrale.*

### ■ mots clés

télédétection, photogrammétrie, modèles numériques d'élévation, climatologie urbaine, capteurs très haute résolution.

### Contexte du projet RECIUS 3

Le projet RECIUS 3 (Rayonnement et bilan d'Énergie en Climatologie Urbaine à Strasbourg) initié par le LSIIT et financé par le Programme National de Télédétection Spatiale a pour objectif l'analyse et l'exploitation de mesures de télédétection pour la modélisation des bilans radiatifs et énergétiques dans les zones urbaines [Najjar et al., 2003].

Les préoccupations sous-jacentes consistent, notamment, dans un contexte d'urbanisation croissante souvent à forte densité de bâti, en la détermination des paramètres du climat urbain et en l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air, dans un souci de maîtrise des effets de pollution atmosphérique.

Le but est de déterminer à l'échelle de la rue "canyon urbain" puis du quartier, les flux majeurs intervenant dans l'équation du bilan radiatif (1) et du bilan d'énergie (2), d'étudier les différences notables en milieu urbain par rapport à la situation rencontrée en

environnement naturel et enfin de valider la paramétrisation à différentes échelles. Cette paramétrisation est réalisée par le biais de deux modèles existants (cf. § Modélisations envisagées), dont les résultats en sortie seront validés par les mesures au sol et les données de télédétection.

Le bilan radiatif  $R_n$  s'écrit :

$$R_n = (1 - \alpha) R_G - (IR \uparrow - IR \downarrow) \quad (1)$$

avec

$R_G$  : rayonnement global incident

$\alpha$  : albédo défini comme étant le rapport du rayonnement solaire réfléchi sur le rayonnement global incident

$IR \uparrow$  : rayonnement infrarouge émis

$IR \downarrow$  : rayonnement infrarouge incident

Le bilan d'énergie s'écrit :

$$R_n + H + LE + S = 0 \quad (2)$$

avec

$H$  : flux de chaleur sensible

$LE$  : flux de chaleur latente

$S$  : flux de chaleur dans le sol

La zone d'étude choisie est la zone urbaine de Strasbourg en raison de l'existence d'une base de données très consé-

quente en données micro-météorologiques, atmosphériques et d'imagerie.

### ■ Base de données disponible

Pour constituer cette base de données, une importante campagne de mesures a été réalisée en juillet 2002 dans le cadre du projet RECIUS 2. Elle comprend :

#### • des données micro-météorologiques :

Elles ont été effectuées

- à l'échelle du canyon urbain : mesure sur 4 niveaux d'un échafaudage de 25 m (Figures 1 et 2) de paramètres climatologiques standards (température de l'air, humidité, vent), de bilans radiatifs (dans le visible et l'infrarouge) et d'énergie (chaleur sensible et latente), etc.

- à l'échelle du quartier : mesure sur des mâts, à 30 m au dessus du sol, de bilans d'énergie, d'un bilan radiatif complet ainsi que du flux de chaleur sensible (Figure 3) ; et mesures mobiles, le long des transects d'étude, de température et d'humidité à partir d'un véhicule muni d'un GPS.





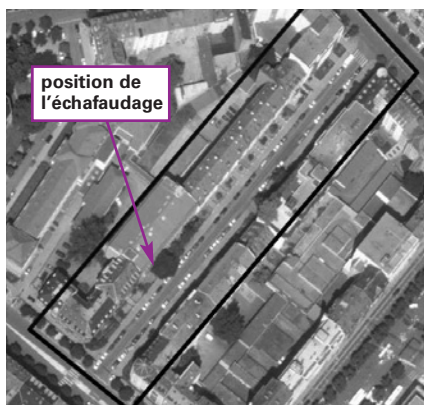
▲ **Figure 1 :** Echafaudage mis en place rue de l'Argonne (Strasbourg).



▲ **Figure 2 :** Appareils de mesures installés sur l'échafaudage de la rue de l'Argonne.



**Figure 3 :** Instruments de mesure installés au sommet d'un mât de 30 m.



**Figure 4 :** Rue de l'Argonne à Strasbourg, sélectionnée comme "canyon urbain". Photo aérienne au 1/8000, plein Nord.

- **des données atmosphériques :** 11 radiosondages pendant les jours de vols servent à effectuer les corrections atmosphériques des images obtenues. Les 5 paramètres mesurés par radiosondage sont la pression, la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent.
- **des données de téledétection :** 6 images acquises le long de deux traces perpendiculaires de 10 km le 27 et le 28 juillet 2002 durant 3 vols réalisés par le capteur aéroporté hyperspectral DAIS (DLR) couvrant le domaine du visible à l'infrarouge thermique. De plus, des mesures ont été effectuées à l'aide d'une caméra infrarouge thermique (INFRAMETRICS, INRA Bordeaux) héliportée, et d'une caméra infrarouge thermique (AGA, LSIIT) au sol.

Des mesures complémentaires, réalisées avec un spectroradiomètre GER travaillant dans le domaine solaire et des radiomètres infrarouges thermiques, ont servi de mesures de référence et ont permis de valider les données DAIS corrigées de l'atmosphère.

A l'échelle du "canyon urbain", une rue de Strasbourg a été sélectionnée et équipée des dispositifs décrits précédemment (Figure 4). A l'échelle du "quartier", le secteur situé dans les environs de cette rue a été considéré.

## ■ Modélisations envisagées

Deux modèles atmosphériques bien adaptés à l'environnement urbain sont utilisés : le modèle SOLENE du CERMA de Nantes (à l'échelle du canyon) et un schéma de paramétrisation de la surface TEB-ISBA de Météo-France (à l'échelle du quartier).

Le modèle SOLENE permet de prendre en considération la géométrie du système, la réflectivité et l'émissivité des différents éléments et leurs inter-réflexions. Il permet ainsi d'évaluer la fraction utile du rayonnement (solaire et infrarouge) en modulant les diffé-

rentes composantes. La résolution des équations des bilans radiatifs et énergétiques des éléments considérés permet en outre d'accéder à leur température de surface et aux flux de chaleur sensible. A l'échelle du canyon, la validation des sorties de SOLENE se fait en comparant celles-ci aux mesures locales directes (composantes du rayonnement net, mesures distribuées de la température de surface, valeurs du flux de chaleur sensible).

A l'échelle du "quartier" les comparaisons se font avec les mesures directes des composantes du bilan radiatif et les flux de chaleur sensible réalisées au sommet des mâts.

Le modèle TEB-ISBA, construit selon le concept du canyon urbain, est mieux adapté à l'échelle du "quartier" de part les simplifications qui lui ont été appor-

tées. Dans le but d'évaluer sa sensibilité, il sera validé dans un premier temps à l'échelle du canyon. La validation à l'échelle du quartier se fera par comparaison avec les mesures et les sorties intégrées de SOLENE.

L'utilisation de ces deux modèles nécessite, en entrée, la connaissance d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de la zone d'étude. A ce stade, l'emploi de techniques photogrammétriques est nécessaire (cf. § Volet photogrammétrique). Les données de télédétection, quant à elles sont exploitées pour la restitution de divers paramètres, la réalisation d'une carte d'occupation des sols (étant donné que l'occupation des sols contribue au bilan radiatif et à la dynamique des flux), et pour l'extrapolation des résultats issus des modèles utilisés à l'échelle du canyon urbain à l'échelle de l'agglomération (cf. § Volet télédétection).

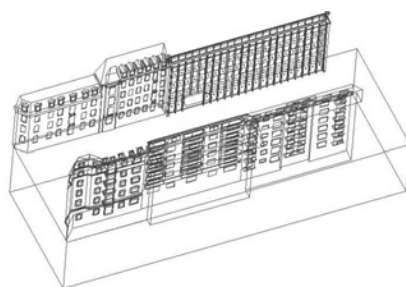
## Volet photogrammétrique

L'utilisation des deux modèles SOLENE (CERMA de Nantes) et TEB-ISBA (Météo-France) nécessite, en entrée, la connaissance d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de la zone d'étude. Ces MNE sont réalisés par voie photogrammétrique.

L'équipe PAGE est chargée de fournir un modèle tridimensionnel de la ville de Strasbourg. A partir de prises de vues aériennes à l'échelle 1/8 000, la volumétrie urbaine est modélisée par stéréo-restitution en prenant en compte trois niveaux d'information (géométrique, topologique et sémantique). La Figure 5 présente le résultat de la restitution des façades des bâtiments de la rue de l'Argonne.

Depuis 1999, un module spécifique du logiciel de photogrammétrique TIPHON (INSA de Strasbourg) a permis d'entreprendre la saisie des paramètres géométriques nécessaires à TEB (hauteur de la canopée, densité du bâti, rapport entre surface de façade et surface au sol du bâti, rapport d'encaissement). Les calculs de rugosité géométrique et aérodynamique ainsi que les facteurs de visibilité découlent de la restitution de la volumétrie des bâtiments regroupés par zones homogènes [Al Khalil, 1999].

D'autre part, la rue dans laquelle ont eu



**Figure 5 : Modèle filaire issu de la restitution des façades de la rue de l'Argonne (Strasbourg).**

lieu les mesures climatologiques a été modélisée sur la base de prises de vues terrestres par des procédés de photogrammétrique architecturale multi-image et de photo-modélisation [Grussenmeyer, 2003]. Les modèles volumétriques obtenus sont ensuite transformés dans un format spécifique (CIR) au logiciel SOLENE. La Figure 6 présente la volumétrie des bâtiments de la rue de l'Argonne telle qu'elle est intégrée dans le modèle SOLENE.

## Volet télédétection

Les données de télédétection sont utiles dans plusieurs étapes du projet.

### ■ Extraction de paramètres géophysiques

Les images DAIS sont dans un premier temps corrigées des perturbations atmosphériques en utilisant un code de transfert radiatif (MODTRAN 4) avec en entrée les données atmosphériques issues des radiosondages.

Différents types d'algorithmes développés par l'équipe du LSIIT/TRIO ont permis de réaliser la restitution de l'albédo solaire ainsi que la détermination de l'émissivité et de la température de surface. Le code COCHISE développé par l'ONERA permet d'obtenir les réflectances sols, mais aussi l'estimation du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère et sa variabilité spatiale dans l'atmosphère urbaine.

### ■ Confrontation avec les mesures directes

Il s'agit de comparer les mesures de télédétection ramenées au niveau de la surface aux mesures effectuées au sol (termes du bilan radiatif et mesures de flux), dans une optique de validation des données de télédétection. Par exemple,



**Figure 6 : Modèle volumétrique des bâtiments de la rue de l'Argonne (Strasbourg).**

les mesures réalisées avec des radiomètres IRT sur plans d'eau seront comparées à celles des images issues de DAIS ou de la caméra héliportée.

### ■ Outil de spatialisation d'informations ponctuelles

Par l'information spatialisée inhérente aux données de télédétection, celles-ci interviennent pour valider les résultats en sortie des modèles utilisés, étudier la variabilité spatiale des paramètres géophysiques et pour étendre les résultats (obtenus à l'échelle du canyon urbain et du quartier) à l'échelle de l'agglomération.

### ■ Détermination de l'occupation du sol

L'occupation du sol contribuant au bilan radiatif et à la dynamique des flux, une cartographie précise de l'occupation des sols à l'échelle de l'agglomération est indispensable et est abordée dans le paragraphe suivant selon deux approches.

## Cartographie d'occupation des sols

### ■ Données disponibles

Les images disponibles dans ce projet sont des données hyperspectrales DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer), capteur aéroporté mis au point par le DLR (Oberpfaffenhoffen).

Les images DAIS ont été acquises à une altitude d'environ 2000 mètres conduisant à une résolution spatiale de l'ordre de 4 mètres, pour une fauchée de 1 km environ. Les survols de Strasbourg ont été effectués le 27/28 juillet 2002 en matinée, début d'après-midi et fin d'après-midi. Chaque survol consiste en deux lignes de vol perpendiculaires orientées N-S et O-E d'une longueur de près de 10 km et dont l'intersection couvre une partie substantielle de



■■■ Strasbourg intra muros. Ces vols ont été financés dans le cadre du programme HySENS de la communauté européenne.

Des images du satellite Quickbird (DigitalGlobe) multispectrales et panchromatiques, acquises au départ à d'autres fins que celles du projet, sont également considérées dans cette étude. Le satellite Quickbird est à l'heure actuelle le satellite fournissant la plus fine résolution spatiale parmi les satellites commerciaux existants.

Les caractéristiques techniques des deux capteurs sont présentées dans le Tableau 1.

Préalablement à toute analyse spectrale, il est toutefois nécessaire de réaliser des pré-traitements de type géométrique et/ou radiométrique.

## ■ Pré-traitements

### Géoréférencement

Etant donné l'excellente résolution spatiale de l'image Quickbird panchromatique, elle a été choisie comme image de référence pour le calage ultérieur des images DAIS.

En raison du manque d'informations concernant les paramètres d'attitude du satellite au moment de l'acquisition des images Quickbird et du relief de la zone d'étude que l'on peut considérer comme plat à l'échelle du quartier, la scène Quickbird a été géoréférencée sur la base d'un ensemble de points de calage. Ces points de calage, distribués sur l'ensemble de la scène avec une densité plus importante sur le quartier instrumenté, ont été observés par GPS et complétés par mesures stéréoscopiques sur photos aériennes. Au total

15 points ont été observés et ont permis de calculer par transformation polynomiale du second ordre l'image géoréférencée dans le système Lambert Zone I, avec des erreurs moyennes quadratiques sur la position des points inférieures au pixel.

Le résultat issu du calage des images DAIS par saisie de points homologues sur la scène Quickbird a souligné la nécessité de prendre en compte les turbulences subies par l'avion, donc de disposer des données DGPS et des paramètres d'attitudes du capteur afin de déterminer la fonction géométrique liant le capteur à la cible au moment de l'acquisition.

Néanmoins, une rectification géométrique fine de ces données DAIS n'a pas été jugée indispensable à ce stade. En raison des objectifs prioritaires d'extraction de paramètres géophysiques et de confrontation des données de télédétection avec les mesures directes, il est important, dans cette première phase, de conserver l'information radiométrique brute.

La réalisation de l'ortho-rectification des images DAIS pourra donc faire l'objet d'un travail de fin d'études.

### Réduction de la dimension spectrale

Après soustraction des bandes bruitées, les quelques 70 bandes spectrales restantes constituent un espace spectral trop important à gérer, tant d'un point de vue temps de calcul que susciterait un traitement ultérieur, que d'un point de vue quantité d'informations redondantes.

Au vu de la corrélation existant entre bandes adjacentes, il a été décidé de

réduire l'espace de stockage en minimisant la perte d'information. Parmi les méthodes existantes et qui ont fait leur preuve sur des images hyperspectrales ([Lennon, 2001], [Scherf, 2003], etc.) celle de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée à notre jeu de données DAIS.

Les vecteurs propres de la matrice de covariance ont montré une très forte participation des bandes situées dans le moyen infrarouge au détriment des autres. De plus, étant donné une forte corrélation entre les bandes d'un même domaine de longueurs d'ondes, et suite à plusieurs expérimentations, les premières composantes principales ont été conservées et ont constitué la base de données pour la classification.

Les images DAIS ont ensuite été classifiées suivant deux approches : une approche conventionnelle et une approche orientée-objet.

## ■ Classification conventionnelle

La première approche est une technique classique ayant fait ses preuves en imagerie satellitaire à moyenne résolution à savoir la classification dirigée suivant le principe du maximum de vraisemblance.

Afin de réduire la présence de pixels isolés dans les différentes classes, un filtre de généralisation spatiale a accompagné cette classification.

### Choix des classes d'objets

Les zones échantillons ont été sélectionnées à partir de l'image Quickbird et de photos aériennes, avant d'être contrôlées et validées par une reconnaissance terrain réalisée durant l'été 2003.

Les classes ont été établies dans un premier temps sur la base de celles employées pour la classification d'occupation du sol réalisée pour le projet REKLIP 1992 [Najjar & Biron, 2004]. Le tableau 2 présente les classes considérées pour notre projet, mises en parallèle avec celles établies pour REKLIP92.

Etant donnée la différence de résolution spatiale des capteurs employés dans les deux projets, il a été possible de discriminer des classes pour RECIUS3 qui n'intervenaient pas dans REKLIP92 ces dernières découlant essentiellement

Capteur	Résolution spatiale	Bandes spectrales
<b>DAIS 7915</b> (aéroporté)	hyperspectral : 3 à 20 m (suivant l'altitude de vol)	79 bandes étroites entre 496 et 12296 nm
<b>Quickbird</b> (satellitaire)	panchromatique : 0.61 m (nadir)	450 à 900 nm
	multispectral : 2.44 m (nadir)	450-520 nm 520-600 nm 630-690 nm 760-900 nm

**Tableau 1 : Caractéristiques techniques des capteurs pris en compte dans le projet.**

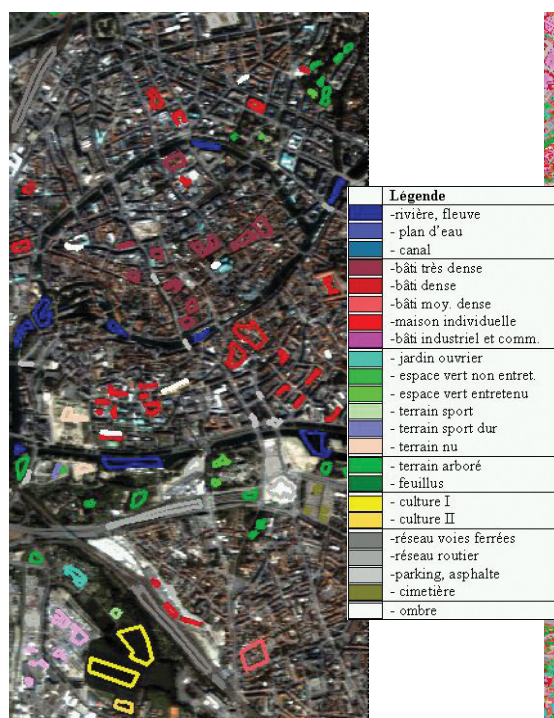
d'images LANDSAT-TM. On peut citer notamment les classes "réseau routier", "parking", "bâtisse individuelle", etc. D'autres classes, telles que "verger sur prairie" pour REKLIP92 peuvent être dissociées en "terrain arboré" et "arbres isolés".

Les classes doivent bien entendu avoir un sens pour l'objectif fixé mais doivent aussi mettre en évidence les possibilités offertes par la résolution des images employées.

### Résultats et commentaires

Dès les premiers traitements, il s'est avéré que tous les pixels situés dans les zones d'ombre, quelle que soit leur nature, ont été regroupés dans une même sous-classe, affectée elle-même à la classe "eau". Il a donc été nécessaire de considérer une classe "ombre" distincte des classes effectivement concernées dans la réalité [Bianchin & Barvin, 2003]. La présence de l'ombre est en effet très nette sur les images captées l'après-midi.

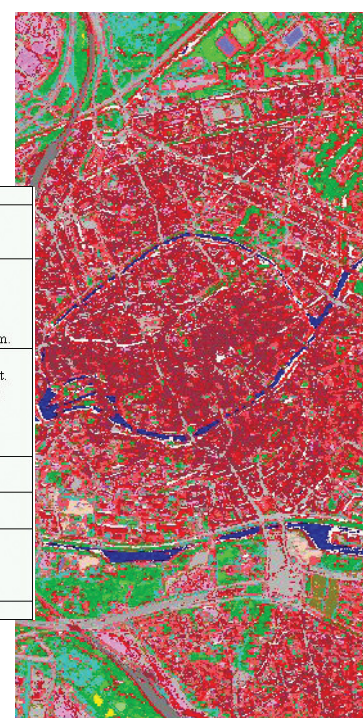
La matrice de confusion calculée pour la classification finale a fourni une précision globale de 86 % et un coefficient Kappa de 0.85, ce qui est satisfaisant vue la zone d'étude. La Figure 7 présente un extrait du transect N-S sur lequel ont été saisies les zones échan-



**Figure 7 : Image DAIS en couleurs réelles RGB=11/5/1, avec zones échantillons saisies (transect N-S).**

tillons. La Figure 8 présente la classification résultante.

Il était prévisible que la classe "cimetière" provoque des conflits avec d'autres classes telles que "parkings" ou "jardins ouvriers" ; de même la classe



**Figure 8 : Classification dirigée par maximum de vraisemblance avec 24 classes d'intérêt.**

"jardin ouvrier" présente des confusions avec la classe "arbres isolés" ou "bâti moyennement dense". Il n'a été possible de remédier que partiellement à ce problème pour deux raisons.

La première raison est liée à la définition sémantique des classes. Par exemple, quelle limite sépare le bâti dense du bâti moyennement dense ou peu dense ? La seconde raison est liée au fait que la classification dirigée est basée sur l'hypothèse que chaque classe saisie a une signature spectrale unique. Donc les taux de confusions entre classes sont parfois si élevés qu'il est nécessaire de définir de nouvelles classes thématiques, plus générales que les premières [Caloz & Collet, 2001].

Une catégorisation en classes thématiques plus générales n'est pas souhaitée pour le moment étant donné que l'extraction de certains paramètres géométriques (contours ou toits de bâtiments par exemple) seront d'un grand intérêt dans un futur proche.

La présence de pixels (et mixels) isolés reste le facteur le plus pénalisant dans ce résultat et souligne que les processus d'analyses d'images basés sur le seul critère de la ressemblance

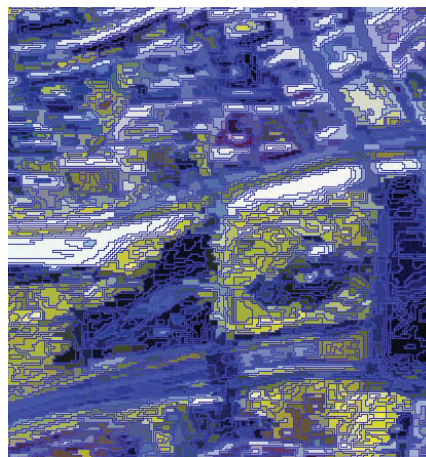
Classes REKLIP 92	Classes RECIUS 3
eau	rivière, fleuve - plans d'eau - canal
bâti dense bâti moyen dense bâti lâche bâti industriel	bâti très dense (hypercentre) bâti dense - bâti moy. dense bâtisse individuelle bâti industriel et commerciale
verger sur prairie, jardin vigne - prairie	jardin ouvrier - vigne espace vert non entretenu (arbustes, prairie) espace vert entretenu (pelouse, gazon, parc) terrain sport (vert) - terrain sport dur terrain nu (chantier, sable)
conifères dominants mixte - feuillus dominants	terrain arboré, arbres isolés forêt feuillus
cultures d'hiver cultures printemps	culture I (maïs) culture II
	réseau voies ferrées - réseau routier parking, asphalté - cimetière
brumes, nuages	ombre

**Tableau 2 : Correspondance entre les classes choisies pour RECIUS 3 et REKLIP92.**

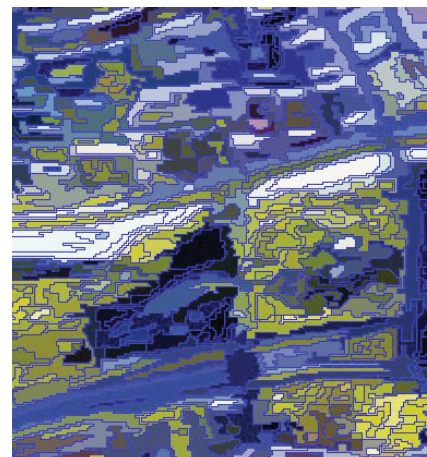




**Figure 9a : Image DAIS brute, transect Nord-Sud**



**Figure 9b : Segmentation de niveau 1 (poids affecté au critère spectral).**



**Figure 9c : Segmentation de niveau 2 (poids affecté au critère spectral).**

■ ■ ■ spectrale ne suffisent plus à classer les quantités d'informations stockées dans des images à très haute résolution [Caloz & Collet, 2001]. Il est nécessaire d'exploiter le contexte spatial du pixel.

## ■ Classification contextuelle

La technique de classification orientée-objet conçue dans le logiciel eCognition (Definiens Imaging) est basée sur le concept que l'information sémantique nécessaire à la classification d'une image n'est pas inhérente à des pixels individuels, mais à des objets homogènes (agrégation de pixels similaires) et aux relations liant ces objets entre eux.

Ces objets sont générés par un processus de croissance de région à plusieurs niveaux d'homogénéité, appelé segmentation multi-résolution. En se basant sur des critères spectraux et spatiaux (couleurs et forme), cette segmentation répond ainsi partiellement au problème, soulevé précédemment, de la variabilité spatiale et spectrale de la signature des pixels d'une même classe. De plus, la segmentation résulte en un réseau hiérarchique d'objets où chaque objet est connecté à son voisin horizontal (dans un même niveau de segmentation) ou vertical (entre niveaux de segmentations) [Baatz & Schäpe, 2000]. Les figures 9b et 9c présentent plusieurs niveaux de segmentation. On peut observer que le niveau choisi dépendra des entités spatiales que l'on désire mettre en évidence. Pour une première cartographie d'occupation du sol, le niveau 2 a été sélectionné car la taille

des objets correspond aux emprises attendues pour les différentes classes.

L'analyse orientée-objet dans eCognition est caractérisée par la multitude d'informations additionnelles qui peuvent être dérivées de chaque objet ou région. Les critères disponibles peuvent être classés en :

- des critères intrinsèques : représentent la couleur (compte numérique), la texture et la forme des objets.
- des critères topologiques : décrivent les relations géométriques entre les objets ou dans la scène complète (position, distance, relatives ou absolues,...).
- des critères contextuels : décrivent les relations sémantiques entre objets. Par exemple : une zone urbaine très dense est entourée en majorité de zone urbaine dense.

Cette variété de critères permet la discrimination des classes dans un espace à  $n$  dimensions, bien plus vaste que l'espace – uniquement à dimension spectrale – pris en compte dans la classification précédente.

## Choix des classes d'objets

Nous avons conservé les mêmes classes d'objets et saisi les mêmes zones échantillons, dans la mesure où le niveau de segmentation le permettait (Figure 10).

Dans le cas où seules les zones échantillons et les critères spectraux constituent les critères de discrimination, le classificateur fournit des résultats comparables à la classification dirigée avec l'algorithme de distance minimale. Mais si l'on profite des critères contex-

tuels cités ci-dessus, dès que des objets sont classifiés sur la base des critères intrinsèques et topologiques, la classification peut être affinée.

## Résultats et commentaires

Le classificateur, basé sur la logique floue, permet d'établir des règles floues, c'est-à-dire des conditions qui doivent être remplies pour qu'un objet soit affecté à une classe avec un certain degré de certitude.

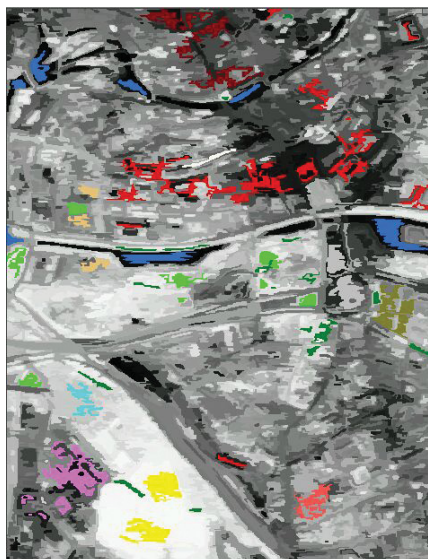
Ainsi, il a été possible d'améliorer la classification en ajoutant nos connaissances et nos descriptions de classes au processus de classification.

La classe "ombre" par exemple, a pu être séparée plus facilement de l'eau à l'aide d'un critère de voisinage, qui spécifiait que la différence en valeur moyenne des pixels d'une région avec les voisins dans le premier néocanal se trouvait dans un intervalle de valeurs seuils (cf. Figure 12). Néanmoins, le critère n'est pas encore suffisant pour couvrir la totalité des zones d'ombres.

Etant donnée la géométrie des objets constituant la classe "rivière", une règle faisant intervenir le rapport particulièrement grand de la largeur sur la longueur de ces objets a été intégrée dans le processus de décision. Le niveau de segmentation joue à nouveau un rôle déterminant pour l'emploi de ce critère géométrique.

Les résultats obtenus avec ce second classificateur sont présentés Figure 11. Certaines classes nécessitent d'être améliorées tandis que d'autres sont





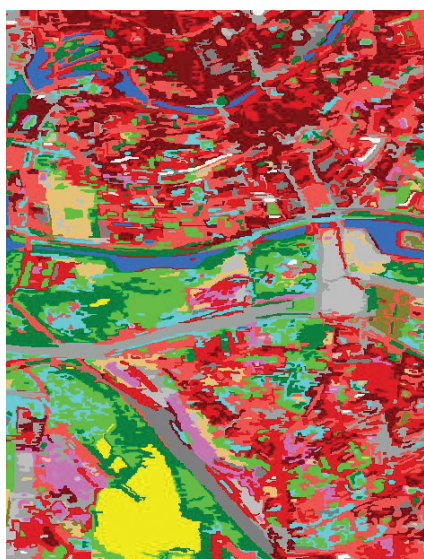
**Figure 10 :** Échantillons sélectionnés sur le niveau de segmentation 2 (extrait du transect Nord-Sud).

clairement définies. Si la précision globale est meilleure qu'avec la classification dirigée, il faut toutefois rester prudent quant aux conclusions à tirer.

On constate en effet une plus grande homogénéité des classes obtenues, mais également une amélioration dans la discrimination des classes "eau", "réseau routier", "ombre". Par contre, la présence forte de jardins ouvriers en zone bâtie mérite d'être affinée. Pour ce faire, des pré-traitements de type texturage [De Kok et al., 2003] ou filtrage [Lennon et al., 2002] préalables à la classification sont envisageables. L'objectif est d'arriver à l'établissement de règles prenant en compte des critères plus appropriés pour l'extraction de ces classes.

Théoriquement, si chaque classe pouvait être décrite précisément par un ensemble de règles de reconnaissance, ce noyau de règles devrait être directement transférable sur des images issues du même capteur et ayant subi une segmentation similaire. L'approche semble donc prometteuse.

Une classification faisant abstraction des zones échantillons et se basant uniquement sur les règles floues n'a toutefois pas été réalisée dans cette étude. Si certaines classes sont aisément descriptibles, il n'en est pas de même pour des classes de type bâti commercial / industriel ou dense / moy. dense en raison de

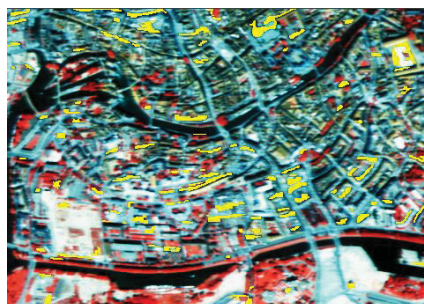


**Figure 11 :** Classification obtenue avec eCognition (échantillons et règles floues) ; 24 classes.

la complexité grandissante des règles d'appartenance à établir. L'intégration d'une couche supplémentaire thématique du type Plan Local d'Urbanisme devrait augmenter la fiabilité des règles établies [Esch et al., 2003].

Cet exemple montre clairement que non seulement l'écriture des conditions mais aussi le degré de segmentation choisi sont déterminants. Le niveau choisi dans cette expérimentation convient à la discrimination de classes relativement homogènes et linéaires, telles que l'eau ou les réseaux.

Par contre, si des paramètres géométriques tels que l'emprise de bâtiments, la surface des toits, etc. doivent être considérés par la suite, il faudra envisager un autre degré de segmentation pour les classes de bâti. L'étude correspondante se basera fort probablement



**Figure 12 :** Extraction de la classe "ombre" (jaune ici) à l'aide uniquement d'une fonction d'appartenance (à gauche ci-contre).

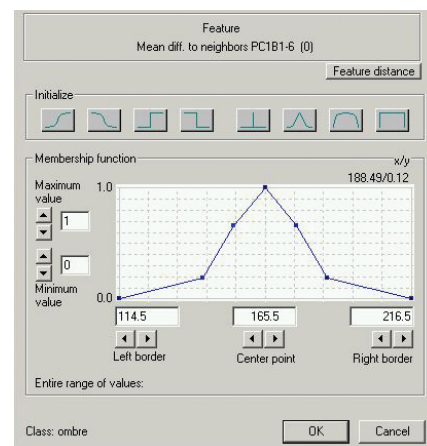
sur des données de meilleure résolution spatiale telles que les images Quickbird. La discrimination qui en découlera devra permettre de compléter les paramètres géométriques d'ores et déjà observés par photogrammétrie.

## Conclusion et perspectives

Le projet RECIUS 3 rassemble autour d'un même objectif plusieurs équipes de recherche dont les axes sont pourtant initialement distincts. S'il a pour objectif à plus ou moins long terme de modéliser les bilans radiatifs et énergétiques à l'échelle d'une agglomération urbaine, il dépend de l'intégration de produits réalisés par photogrammétrie et par télédétection.

Cet article a présenté plus particulièrement les traitements réalisés par télédétection en vue d'établir une méthodologie de classification d'occupation de sols. Ainsi deux approches ont été évoquées. L'approche adoptée classiquement a montré des faiblesses. En effet, depuis l'avènement des images à très haute résolution spatiale, les processus d'analyses d'images basés uniquement sur les valeurs spectrales des pixels ne suffisent plus à classer les quantités d'informations stockées dans l'image. Ces processus se doivent d'intégrer les connaissances a priori que l'analyste a de ces objets.

Dans ce contexte, une seconde approche orientée-objet a été étudiée. D'une part, l'unité élémentaire d'une image est à présent l'"objet" et non plus le pixel. D'autre part, cette approche met à disposition de l'analyste – en plus des critères spectraux – une quantité impres-



■ ■ ■ sionnante de critères contextuels aidant à la discrimination des classes. Ainsi, la classification d'occupation du sol peut être affinée et renforcée par le biais de règles et de critères contextuels.

Toutefois, la mise en œuvre de règles d'affectation sur la base de ces critères peut devenir très rapidement extrêmement complexe et laborieuse. De plus, les responsabilités de l'analyste par l'introduction de règles "subjectives" n'en sont que plus accrues.

Beaucoup de travail d'analyse reste donc nécessaire jusqu'à l'aboutissement de règles automatiques qui soient adaptables aisément aux autres images acquises durant la campagne de vol. Une fois ces cartographies validées, l'étape de mise en corrélation avec les paramètres climatologiques peut débiter.

Dans un objectif davantage géométrique que thématique, l'approche classification orientée-objet par la logique floue a pu être appliquée de façon plus discriminante à l'extraction de bâtiments [Boulaassal & Neusch, 2004]. Le contour de bâtiment peut en effet être utile à l'élaboration de paramètres géométriques, voire d'indices numériques, connus pour affecter les termes du bilan radiatif. ●

## Références

- Al Khalil, O., (1999).** *Méthodes de caractérisation de la géométrie urbaine en climatologie*. Mémoire de DEA "Systèmes spatiaux et environnement", UFR de Géographie de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg et ENSAIS.
- Baatz M. & A. Schäpe (2000) :** *Multiresolution Segmentation: an optimisation approach for high quality multi-scale image segmentation*. In : Strobl, J.&T. Blaschke (Hrsg) : *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000.
- Bianchin, A. & Barvin, L. (2003) :** *Land use in urban context from IKONOS image: a case study*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXXIV-7, Regensburg, Germany, 27-29 June 2003.
- Boulaassal, H. & Neusch, T. (2004) :**

*Analyse orientée-objet pour la détection de bâtiments à partir d'une image satellitaire à très haute résolution spatiale*. Revue de l'Association Française de Topographie, XYZ n°101, ISSN 0290-9057, 4<sup>e</sup> trimestre 2004, pp.25-28.

**Caloz, R. et Collet, C. (2001) :** *Précis de Télédétection ; Vol.3. Traitements numériques d'images de télédétection*, Presses de l'Université du Québec.

**De Kok R., Wever T., Fockelmann R. (2003) :** *Analysis of urban structure and development applying procedures for automatic mapping of large area data*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXXIV-7, Regensburg, Germany, 27-29 June 2003.

**Esch, T., Roth, A., Günter, S. Dech, S. (2003) :** *Object-oriented classification of Landsat-7 data for regional planning purposes*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXXIV-7, Regensburg, Germany, 27-29 June 2003.

**Grussenmeyer, P., 2003 :** *Photogrammétrie architecturale et modélisation 3D du patrimoine*. Revue de l'Association Française de Topographie. ISSN 0290-9057, 2e trim. 2003 N°95, p.30-36.

**Lennon, M., Mercier, G., Mouchot, M.C., Hubert-Moy, L., (2001) :** *Independent Component Analysis as a tool for the dimensionality reduction and the representation of hyperspectral images*. IGARSS 2001, 9-13 July 2001, Sydney, Australia.

**Lennon, M., Mercier, G., Hubert-Moy, L., (2002) :** *Classification of hyperspectral images with nonlinear filtering and support vector machines*. IGARSS 2002 Conference, Toronto, Canada.

**Najjar, G., Biron, P. (2004) :** *Projet REKLIP*. Rapport final du groupe Bilan Hydrique. Parution fin 2004

**Najjar, G., Kastendeuch, P.P., Stoll, M.P., Colin, J.R., Nerry, F., Ringenbach, N., Bernard, J., De Hatten, A., Luhahe, R., Viville, D. (2003):** *Télédétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg, le projet RECLUS* (article soumis à "La Météorologie").

**Scherf, M., Hill, J., Baerisch, S. and**

**Atzberger, C. 2003 :** *Einfluss der spektralen und räumlichen Auflösung von Fernerkundungsdaten bei der Nadelwaldklassifikation*, PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 2003, Heft1.

## Contact

**Tania LANDES**  
**Pierre GRUSSENMEYER**

PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique)-MAP-UMR 694  
INSA de Strasbourg - 24 Boulevard de la Victoire F-67084 Strasbourg Cedex  
Email: tania.landes@insa-strasbourg.fr ou pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr

**Georges NAJJAR**

LSIIT (Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection)/TRIO  
UMR 7005 - Pôle API  
5 bd Sébastien Brant - 67400 Illkirch  
Georges.Najjar@mail-grtr.u-strasbg.fr

## ABSTRACT

*Remote sensing and photogrammetry become closer as never before and this tendency is remarkable in sensor technologies as well as in geometrical processings of the image. The complementary use of both techniques is reflected in projects such as RECLUS 3 (Rayonnement et bilan d'Energie en Climatologie Urbaine à Strasbourg) initiated by LSIIT. This project aims to model the radiative and energy balance equations based on micrometeorological, atmospheric and remote sensed data collected in and over the urban zone of Strasbourg. The measurement campaign will be described before considering photogrammetric and remote sensing aspects. Afterwards, we will focus more particularly on the results obtained by the use of two classification approaches which lead to a land cover thematic map using high resolution images.*





# Le 1<sup>er</sup> Forum de Topométrie le 17 mars 2005 : GPS et stations totales

■ Michel KASSER

*L'AFT, depuis quelques années n'avait plus eu l'occasion d'organiser des forums, malgré les succès des derniers Congrès (CITOP). En 2003, l'association avait été extrêmement sollicitée par l'organisation du Congrès de la FIG en France, à Marne La Vallée, une très grosse opération menée à la satisfaction des collègues du monde entier en commun avec l'OGE : le Conseil de l'AFT, suivant la demande réitérée de ses adhérents, s'était donc proposé de renouveler ses animations professionnelles en démarrant une nouvelle série de Forums dès que possible. Les principes généraux retenus ont été les suivants :*

- *un ou plusieurs Forums chaque année,*
- *dans des grandes villes faciles d'accès*
- *reposant nominalement sur les établissements d'enseignement du domaine.*
- *avec une thématique fixée bien évidemment en fonction de l'actualité.*



Compte tenu de l'organisation régulière des Journées de la Topographies à l'INSA de Strasbourg en Septembre, du Cercle-Géo à l'ESGT en hiver au Mans, et des Forums thématiques de l'ENSG (GPS, photogrammétrie, cartographie, SIG, chacun étant pris en charge par le cycle de spécialisation lui correspondant), il a été décidé de démarrer la série de ces nouveaux Forums de Topométrie de l'AFT par une journée organisée en région Parisienne. C'était d'abord à l'ENSG pour commencer, comme prolongement de sa série de Forums thématiques, puis le dispositif est prévu pour se poursuivre ensuite en alternance annuelle entre l'ESTP et l'ENSG.

L'organisation de ce 1<sup>er</sup> Forum a été calquée sur celle des Forums de l'ENSG : une seule journée, 4 conférences longues, disposées de façon à laisser beaucoup de temps libre en milieu de matinée et en milieu d'après-midi. Ceci permet aux participants de se retrouver entre eux, ce qui est une des fonctions majeures de ces Forums, et permet aussi de laisser du temps pour visiter les stands des exposants, qui font partie intégrante de l'intérêt de la journée. L'organisation en une seule journée permet à chacun, exposant comme participant, de ne consacrer qu'une durée classique et facilement supportable (le voyage d'affaires habituel) à cet événement. Néanmoins, faute de Cycle spécialisé en Topographie à l'ENSG, c'est le Département de Positionnement Terrestre et Spatial (DPTS), l'un des départements d'enseignement, qui s'est retrouvé de facto organisateur de ce Forum, aux cotés de l'AFT.

Je remercie donc vivement ici le DPTS et les étudiants de l'ENSG pour leur grande implication qui a permis le plein succès de cette journée. Et pour notre Association, c'était l'occasion de réunir en fin de journée ses adhérents pour l'AG annuelle, ainsi que pour remettre les prix aux brillants Lauréats de l'AFT.

Le thème choisi, GPS et Stations Totales, s'est avéré particulièrement d'actualité compte tenu des nouveautés du marché, et a beaucoup intéressé les participants. Ce sont près de 200 personnes qui sont donc venues, malgré la communication très réduite qui avait été faite, et plus de 20 exposants ont fait le déplacement. Les articles qui suivent pourront donner à



Lauréates du prix AFT de gauche à droite : Anne Karsenty et Elise Meyer.



ceux qui n'avaient pu rejoindre Marne La Vallée le 17 mars 2005 une bonne idée des présentations, mais il faut ici se féliciter du succès qu'elles ont pu rencontrer, et des nombreuses questions qu'elles ont suscitées dans le public.

Il y a donc bien un public intéressé par ce type d'animations, et l'AFT se devait de reprendre ce flambeau qu'elle avait déjà porté si haut dans le passé. Et en avant l'an prochain pour la suite à l'ESTP... ●

Les étudiants en STS Géomètre-topographe (1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> année) du lycée JEAN XXIII (Yvetot en Seine Maritime) sont venus au forum proposé par l'AFT au sein de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques, le 17 mars dernier, avec plusieurs objectifs à atteindre :

- **Découvrir les matériels les plus récents** proposés par les divers constructeurs, interroger et s'interroger sur l'évolution constante des techniques de lever. Les jeunes ont été intéressés par la combinaison Tachéomètre-GPS... Des méthodes révolutionnaires en découlent. Le contact avec les exposants a été très concret : utilisation des matériels, visualisation des résultats sur les micro-ordinateurs portables avec, là aussi, les derniers logiciels. La documentation et les explications, ont nourri la curiosité des jeunes et de leurs professeurs.
- **Visiter les locaux de l'ENSG**, notamment les salles de photogrammétrie. Dans la première subsistent les plus anciens restituteurs (analogiques), qui ont été présentés par M. Serre, belle découverte pour les étudiants qui n'abordaient ce point qu'à travers des cours théoriques et imagés par quelques diapositives. La seconde renferme des appareils beaucoup plus modernes (tout numériques), explications et les démonstrations à la clef ont permis une approche de l'utilisation des photographies aériennes dans les nouvelles technologies telle que la géomatique.
- **Conférence...**, Toucher du doigt les problèmes plus singuliers de la topographie, se confronter aux nouvelles technologies et leur vocabulaire spécifique (ex : GPS in door). Les jeunes ont été sensibles à ces nouveautés, et ont compris que la topographie, science ancienne, est toujours en quête d'évolution.

Les Participants Haut-Normands remercient l'AFT pour l'accueil de cette journée.

# Technique de lever par véhicule équipé de récepteurs GPS et d'une station totale

■ Hervé GONTRAN

*Le développement de la télématique des transports réclame la gestion sans cesse croissante de données rattachées à l'espace routier. Des systèmes de lever topométrique mobile peuvent acquérir ces informations, en offrant un gain sensible de productivité grâce à la combinaison d'outils de localisation et de scannage. Néanmoins, de tels systèmes, dont la mise en œuvre est une affaire de spécialistes, imposent un investissement financier considérable tant du point de vue matériel qu'humain. Le Laboratoire de Topométrie de l'EPFL développe un traitement "temps réel" des données issues d'un système de mobile mapping, afin de limiter l'intervention de l'opérateur à cette collecte et de réaliser un contrôle qualité directement sur le terrain. Dans le cadre du 1<sup>er</sup> forum de topographie organisé par l'AFT, nous avons présenté un concept d'intégration de matériel standard (GPS et tachéomètre) pour automatiser l'inventaire de l'environnement routier.*

## ACRONYMES UTILISÉS

**EPFL:** Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
**GGA:** Global Positioning System Fix Data  
**GPSS:** General Packet Radio Service  
**GSM:** Global System for Mobile Communications  
**HDT:** True Heading  
**IMU:** Inertial Measurement Unit  
**NMEA:** National Marine Electronics Association  
**RTAI:** Real-Time Application Interface  
**RTK:** Real-Time Kinematic  
**VSS:** Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute

## Contexte

Les bases de données routières utilisent couramment un système de référence linéaire (SRL) décrivant les objets d'intérêt selon leur abscisse curviligne et leur décalage latéral par rapport à l'axe de la route. En Suisse, un SRL est directement matérialisé sur la route, avec une origine et une série de marques peintes chaque kilomètre à même le revêtement. Or, la plupart des informations géographiques sont collectées et consultées au moyen du système de coordonnées nationales. Si l'on désire combiner des données localisées en coordonnées nationales avec des informations routières, une transformation géométrique entre les deux systèmes est nécessaire.

L'acquisition de tels paramètres motiva la conception d'un système de mobile mapping par le Laboratoire de Topométrie. Ce système, baptisé Photobus, combine une caméra nadirale à des capteurs de localisation pour géoréférencer en temps réel la ligne centrale de la route, ce qui permet de déterminer aisément l'abscisse curviligne  $u$  des objets routiers (Gontran, 2004). De multiples capteurs permettent de déterminer le décalage latéral  $v$ , et dans le cadre de la conférence AFT, nous avons proposé l'utilisation d'une station totale (cf. figure 1).

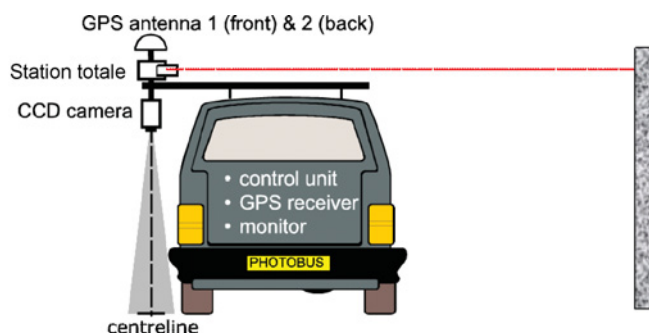


Figure 1 : système Photobus modifié

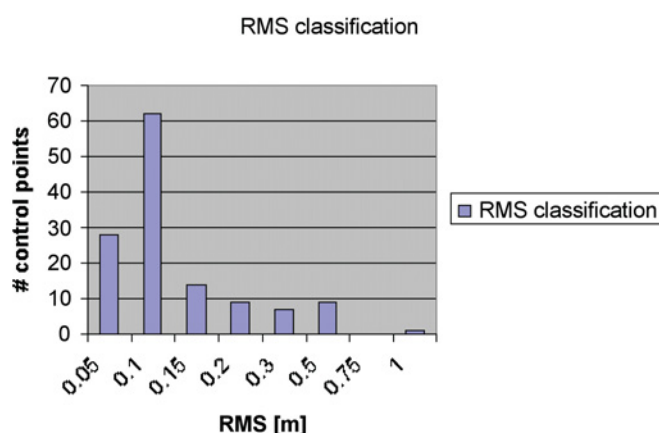
## Détermination d'une géométrie routière de référence

Bien que Photobus puisse embarquer l'ensemble des senseurs nécessaires à la détermination des coordonnées curvilinaires d'un objet routier, nous avons mené une campagne de lever dont la première étape aboutit à la détermination de l'abscisse curviligne, et dont la seconde fournit le décalage latéral. Des tronçons de route furent levés plusieurs fois à l'aide d'une caméra nadirale couplée à des capteurs GPS et inertiels pour assurer un géoréférencement





Figure 2: analyse de qualité sur un tronçon de 40 km



■■■ direct de l'axe de la route avec une précision décimétrique. La figure 2 présente une analyse de la qualité de la localisation réalisée sur 40 km de route rurale ou périurbaine. La valeur moyenne de la précision géométrique absolue est d'environ 12 cm. Il s'agit d'un niveau de précision prometteur pour des applications pointues, cependant, quelques sections caractérisées par des écarts-types supérieurs à 50 cm apparaissent encore. Cela est dû à une longue indisponibilité du signal GPS qui engendre une accumulation des erreurs liées à la localisation inertielle.

Dans tous les cas, Photobus fournit les coordonnées de la ligne centrale de route dans un système de référence local (E, N, h). Pour modéliser et analyser efficacement la géométrie routière, nous devons représenter la route par des fonctions interpolatrices, pour lesquelles les points levés servent de points d'ajustement. Au sens mathématique du terme, une courbe tridimensionnelle est une fonction différentiable  $c$  de  $\mathbf{R}$  vers  $\mathbf{R}^3$  telle que :

$$c(t) = (E(t), N(t), h(t)) \text{ pour tout } t \text{ de } \mathbf{R}; E(t), N(t), h(t) \text{ sont les composantes euclidiennes de } c$$

Nous avons choisi des splines cubiques pour définir les interpolants  $E(t)$ ,  $N(t)$ ,  $h(t)$ . De telles fonctions constituent une interpolation par morceaux par des polynômes du troisième degré entre  $n$  points d'ajustement. Par conséquent, ils prennent en compte tous les détails de la trajectoire en respectant des condi-

tions de continuité sur la position, la vitesse, et l'accélération sur chaque point d'ajustement. Il est démontrable que les splines cubiques minimisent, parmi toutes les fonctions interpolatrices, l'accélération sur la courbe (Atkinson, 2002). Pour toutes ces raisons, les splines cubiques sont particulièrement adaptées à la modélisation de l'axe de la route. Finalement,

$$c(t) = \bigcup_{i=1}^n (E_i(t), N_i(t), h_i(t)) = \bigcup_{i=1}^n \{a_i t^3 + b_i t^2 + c_i t + d_i, e_i t^3 + f_i t^2 + g_i t + h_i, i_i t^3 + k_i t^2 + l_i t + m_i\}$$

où  $a_i, b_i, c_i, d_i$  sont les coefficients de la  $i^{\text{e}}$  spline cubique dans la direction Est.  $e_i, f_i, g_i, h_i$  et  $j_i, k_i, l_i, m_i$  sont respectivement la  $i^{\text{e}}$  spline cubique dans la direction Nord et la verticale.

$n$ : nombre de points d'ajustement.

## Capteurs impliqués dans le calcul des coordonnées curvilignes

La seconde phase de la campagne de lever consiste en la détermination des coordonnées curvilignes d'objets routiers. Pour assurer le calcul de l'abscisse  $u$ , nous avons utilisé un récepteur GPS bi-antenne Javad JNSGyro2 qui fournit à 10 Hz une localisation subdécimétrique et un azimut de l'ordre du dixième de grade par exploitation du concept de station de référence mobile. Un récepteur GPS bi-antenne comporte deux puces incluses dans le même boîtier. L'une d'elle, qualifiée de référence, diffuse des corrections différentielles de phase vers la puce qualifiée de "rover", d'où le calcul à 10 Hz d'un vecteur de précision centimétrique entre les antennes reliées aux deux puces. Néanmoins, la localisation absolue de ce vecteur a la précision du GPS en mode autonome. L'amélioration de cette précision nécessite l'accès à un serveur de corrections GPS différentielles par la puce de référence. Une connexion Internet via GPRS assure l'accessibilité des corrections sur tout le trajet du véhicule. La figure 3 révèle que le réseau GSM suisse est bien adapté à la diffusion de corrections RTK, puisque aucune dégradation de la précision de localisation n'apparaît en comparaison avec les média traditionnels de communication.

Le décalage latéral se déduit des impulsions laser émises en continu par une station totale Leica TCR705 sans prisme. Les mesures de distance sont récupérées automatiquement par un script de communication série en "GSI Online".

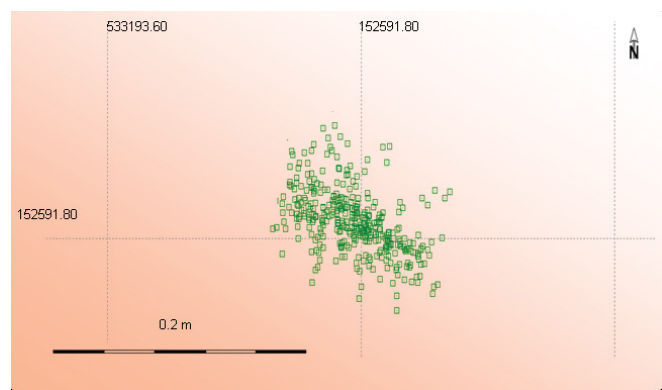


Figure 3: Précision de la localisation RTK via Internet

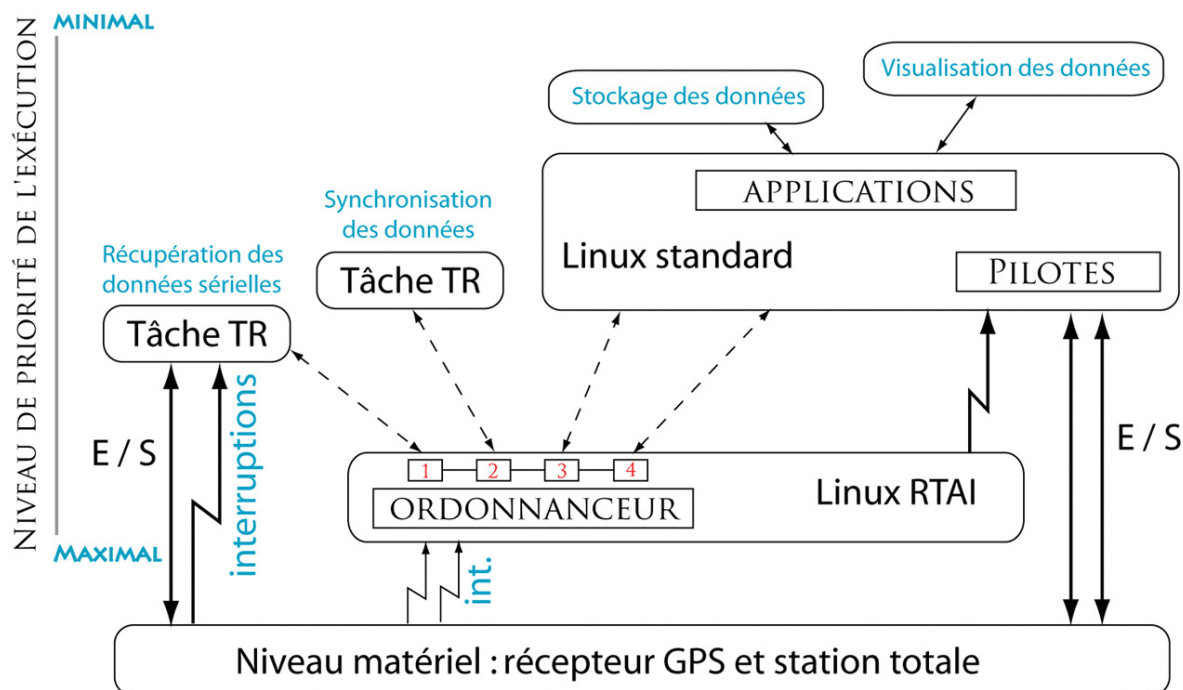


Figure 4: Gestion logicielle du système intégré

## Gestion temporelle du système intégré GPS et tachéomètre

Déterminer des coordonnées curvilignes fiables à partir d'un système cartographique en mouvement passe par une synchronisation optimale des données issues du récepteur GPS bi-antenne et du tachéomètre. Or, ces capteurs produisent respectivement:

- à 10 Hz, une solution de localisation NMEA-GGA et un azimut géographique NMEA-HDT véhiculés par une ligne sérielle à 460,8 bkps, soit 84 octets transmis en 1,4 milliseconde.
- à 3 Hz, une information de distance au format GSI Online via une ligne sérielle à 19,2 bkps, soit 16 octets transmis en 0,8 milliseconde.

Nous devons régler le problème de collision des événements sériels en privilégiant la tâche à valeur ajoutée élevée mais moins fréquente. Il faut donc attribuer la priorité maximale à l'acquisition des mesures du tachéomètre.

L'adoption d'un système d'exploitation "temps réel", répondant à des événements asynchrones issus du monde physique dans des délais prédéterminés, constitue une solution intéressante. Notre choix de système "temps réel" s'est porté sur le noyau Linux RTAI qui est bien établi dans la communauté académique (Abbott, 2003). Ce noyau accomplit des

performances "temps-réel" en surveillant les pilotes de périphérique, les désactivations d'interruption ainsi que les mécanismes de gestion de la mémoire virtuelle qui sont source d'imprévisibilité. En fait, le noyau RTAI s'intercale entre le noyau Linux standard et le matériel, alors que le noyau Linux standard considère la couche temps réel comme le véritable matériel. Théoriquement, l'utilisateur peut définir des priorités pour chaque tâche, si bien que nous pouvons définir un chronométrage des processus correct en agissant sur les algorithmes de planification, les priorités et les fréquences d'exécution. Comme le montre la figure 4, la visualisation et le stockage des positions GPS, des azimuts et des mesures de distance se voient accorder une priorité moindre que la synchronisation des données, tandis que la récupération des dites données par liaison sérielle est accomplie en premier.

## Montage physique et exemples d'utilisation du système intégré

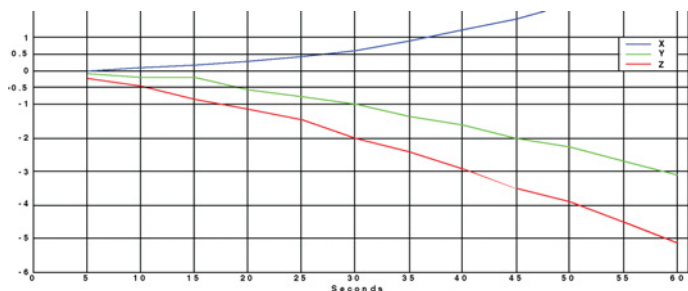
L'implémentation physique du système intégré GPS / tachéomètre passe par deux antennes géodésiques MarAnt+ séparées par une distance de 3 mètres, à mi-chemin desquelles se trouve la station totale. Comme l'indique la figure 5, l'axe optique du tachéomètre est bloqué perpendiculairement à l'axe formé par les antennes GPS ; la précision du cap fournie par ces dernières est estimée à 83 milligrades pour une bonne visibilité satellitaire.

Le lever de l'environnement routier, pour lequel la VSS recommande une précision métrique, est une possibilité d'application d'un tel système intégré. Dans la thématique de gestion de l'entretien, le lever d'espaces verts, de talus, de murs anti-bruits est réalisable à condition de rouler à une vitesse modé-



Figure 5: Montage des antennes GPS et du tachéomètre





Durée de l'absence de signal GPS

**Figure 6 : Evolution de la précision de la localisation par couplage GPS/INS**

■ ■ ■ rée (20 km/h), ce qui correspond à une impulsion de distance par mètre de route. La chaîne de calcul liée à la détermination des coordonnées curvilignes d'un objet routier correspond aux étapes suivantes.

- Par exploitation de la position interpolée de la puce GPS de référence, de l'azimut GPS interpolé et de la demi-longueur du mât de montage, la détermination des coordonnées planes de la station totale est possible.
- A partir de la position de la station totale, de l'azimut GPS interpolé et de la distance horizontale mesurée, les coordonnées planes du point visé sont établies.
- Par projection orthogonale du point visé sur l'axe de la route modélisé, autrement dit, par minimisation de la distance séparant le point visé de l'axe de la route modélisé, on calcule le décalage latéral  $v$  du point visé, puis l'abscisse curviligne correspondante.

La plateforme intégrant GPS et tachéomètre peut également servir à l'enrichissement planimétrique d'orthophotos en offrant des informations planimétriques non extractibles de l'image, du fait de la présence d'ombres ou de toitures. Par exemple, le véhicule embarquant le système intégré circule autour du bâtiment dont l'emprise est à définir. Les points levés sont reliés et les segments ainsi obtenus sont prolongés pour caractériser les coins.

## Perspectives et conclusion

Les techniques de lever précédemment décrites utilisent un récepteur GPS bi-antenne RTK pour localiser et orienter la station totale, si bien que de bonnes conditions de visibilité satellitaire sont nécessaires pour garantir une localisation satisfaisante des éléments routiers. L'utilisation d'une plateforme inertielle (IMU) permet d'assurer une meilleure disponibilité du système. Un capteur inertielle de classe aéronautique Litton LN200 permet de maintenir la précision de la localisation au niveau du demi-mètre pendant une absence de 30 secondes du signal GPS (figure 6). Par ailleurs, les champs d'application du système intégré sont quelque peu limités, la faible cadence de mesure du tachéomètre augmente le risque de manquer des objets d'intérêt. L'intégration d'un laser scanner peut remédier à ce problème.

Le forum topographie fut l'occasion d'exposer une intégration de deux composants standards (récepteur GPS et tachéomètre) en mode dynamique. L'accent fut mis sur l'intérêt d'un système "temps réel" pour assurer la synchronisation optimale des capteurs. Bien que son potentiel d'application soit assez faible, ce concept de base constitue une architecture ouverte pour laquelle la facilité d'intégration temporelle et géométrique des capteurs permet de répondre rapidement à des besoins de lever spécifiques. ●

## Contact

**Hervé GONTRAN**

ingénieur-géomètre ETP

Laboratoire de Topométrie (EPFL) <http://topo.epfl.ch>

[herve.gontran@epfl.ch](mailto:herve.gontran@epfl.ch)

## Bibliographie

**Abbott, D. 2003**, Linux for Embedded and Real-time Applications, Ed. Elsevier Science (USA).

**Atkinson, K. 2002**, *Modelling a Road Using Spline interpolation*, Reports of Computational Mathematics #145, Department of Mathematics, the University of Iowa, Iowa City, USA.

**Gilliéron, P.-Y., Gontran, H., Skaloud, J. 2002**, *Tests with the System Photobus for Road Data Acquisition*, Kinematische Messungen auf Strasse und Schiene, 17-19 September, Munchen, Germany.

**Gontran, H., Gilliéron, P.-Y., Skaloud, J., 2004**, Photobus: Towards Real-Time Mapping, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Vol. XXXV, Part B, Commission 5.

## ABSTRACT

*The development of road telematics requires the management of continuously growing road databases. Mobile mapping systems can acquire this information, while offering an unbeatable productivity with the combination of localization and scanning tools. However, such technically advanced devices go together with significant investments in staff and hardware. The Geodetic Engineering Laboratory of EPFL implements a real-time processing of the data captured by a mobile mapping system, in order to limit the operator's intervention to this collection of data and carry out a quality control directly in the field. For the 1<sup>st</sup> Topography Conference, we presented an integration concept for standard equipment (GPS and tacheometer) to automate the inventory of the road environment.*

# Surveillance à Amsterdam

■ Thierry PERSON - Martin BETH

*La ville d'Amsterdam, fin des années 90, a décidé de se doter d'une seconde ligne de métro. Afin de minimiser les risques inhérents au creusement en plein centre ville d'un tel ouvrage, un système de surveillance très complet a été mis en œuvre. Outre la mise en place de nombreux capteurs ponctuels, un ensemble de tachéomètres robotisés a été installé, conjointement par SolData et IGN (unité des Travaux Spéciaux), afin de quantifier les mouvements éventuels des immeubles inscrits dans la zone d'influence du tunnelier. L'installation de ce type d'appareils nécessite de disposer de points de référence situés en dehors de la zone d'influence du tunnelier en action. Ces points sont d'une importance capitale pour le paramétrage des calculs (appuyés sur un moteur par moindres carrés) et font l'objet actuellement de discussions concernant leur stabilité et des moyens disponibles pour évaluer leurs mouvements éventuels. Une des possibilités réside dans l'utilisation de techniques GPS, qui seraient appliquées conjointement sur certains points de référence et sur certains tachéomètres. Mais d'autres techniques peuvent également être mises à contribution pour disposer d'éléments d'appréciation de la stabilité de ces points, en particulier l'utilisation d'interférogrammes radar.*

## ■ mots clés

topométrie, surveillance robotisée, GPS, interférométrie radar

## Description globale du projet

Le projet de la nouvelle ligne de métro d'Amsterdam inclut une zone du centre ville. Ce secteur, représenté figure 1, est sensible à plusieurs titres :

- zone aux constructions très denses et pour certaines très anciennes
- sol très meuble
- projet difficilement accepté par les résidents

Outre une densité de construction très importante, certaines d'entre elles ont déjà la particularité d'avoir bougé au cours des temps. Ceci est à rapprocher de la nature du sol, globalement très meuble. Ces quelques remarques ont fait, entre autres raisons, que la municipalité a désiré mettre en place un système de surveillance permettant de quantifier les mouvements éventuels de chacun des immeubles inclus dans la zone sensible. Il est également important de noter que ce système a été mis en place par une entité indépendante des entreprises principales chargées de la construction de la ligne.

La durée de surveillance prévue initialement se décomposait en plusieurs tranches :

- une année de surveillance sans travaux afin de connaître les mouvements "naturels" du secteur
- 5 années, environ, de surveillance durant les travaux
- a priori, une année à l'issue des travaux, afin de connaître le nouveau comportement "naturel" et éventuellement détecter des anomalies de stabilisation

Ce calendrier ne sera pas respecté, étant donné que les travaux ont commencé avec du retard, et ne concernent pour l'instant que les stations nouvelles sans présence de tunnelier actif.

Les installations ont consisté à mettre en place les éléments suivants :

- 74 tachéomètres robotisés (appelés Cyclops)



Figure 1 : tracé central du projet

- 5375 prismes
- 174 sondages (de 12 m à 74 m de profondeur)
- 1422 inclinomètres
- 741 extensomètres
- 86 PC
- 4030 repères de nivellement

L'ensemble de ces instruments et accessoires couvre un linéaire de 3,8 km avec des répartitions variables selon la densité d'informations requises et le type d'informations demandées.

Le principe de fonctionnement d'un endroit instrumenté est le suivant :

- l'ensemble des mesures (instrumentation dans le sol et tachéomètre) est acquis et centralisé sur un datalogger
  - ces infos sont transmises par radio vers un relais
  - ce relais envoie les données vers le site central de calculs
- Après cette description succincte de l'ensemble du projet, nous allons nous attacher à présenter plus avant la partie tachéométrie robotisée.



## Les Cyclops

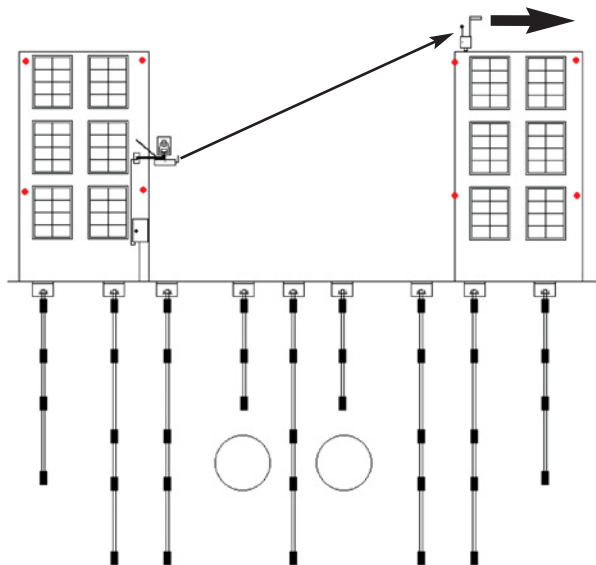
Au nombre de 74 actifs, leurs positions et également leur nombre définitif ont été déterminés en fonction des informations finales recherchées, à savoir, détecter des mouvements verticaux de 0.9 mm et des mouvements planimétriques de 4 mm.

A partir de ces contraintes, du type d'appareils utilisables et de la configuration géométrique des lieux, une simulation de l'ensemble du chantier a été réalisée. Cette simulation a entraîné les considérations suivantes :

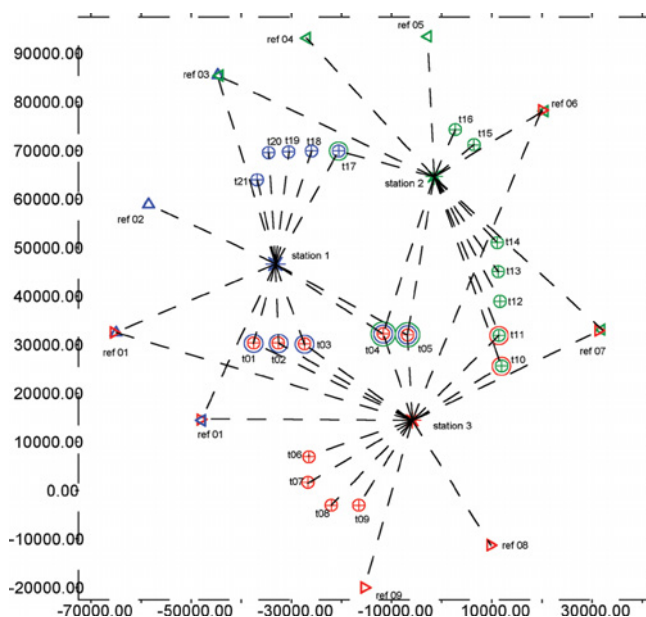
- des distances maximales entre appareil et prisme de 100 m (sauf exceptions liées à des géométries particulières).
- L'impossibilité dans certains cas de disposer de suffisamment de références pour appuyer correctement la position des tachéomètres

Cette dernière remarque nous a imposé de réfléchir à la possibilité de créer des groupes d'appareils, leur association permettant de faire qu'au moins un des tachéomètres soit correctement référencé. Comme dit précédemment, différents types d'appareils peuvent être utilisés, à Amsterdam principalement des Leica TCA1800, TCA2003 ou des Trimble (ex Zeiss Elta S10). Ceci est rendu possible grâce au développement d'un outil d'acquisition d'observations réalisé conjointement par IGN et SolData, TACT. D'autres appareils peuvent également être piloté par TACT : TOPCON et Trimble 5600. Cet outil a été conçu de telle sorte qu'un appareil puisse réaliser ses observations de manière autonome.

Lors de l'installation d'un appareil (et de son PC associé), la première étape consiste à définir les paramètres de communication entre la station totale et l'unité centrale associée chargée de piloter l'ensemble des mesures. Ceci réalisé, il convient ensuite d'initialiser les cycles de mesures en définissant l'ordre des cibles, le nombre de pointés, l'éventualité d'un double retournement, le nombre d'essais nouveaux pour une cible non vue lors d'un cycle normal, les fréquences d'observations des cycles. A ce stade sont également précisés les paramètres de tolérance entre pointés, de fermeture des



**Figure 2 : un secteur instrumenté.** En rouge, la position des prismes ; les flèches correspondent aux transmissions radio.



**Figure 3 : schéma de principe d'un groupe.**

- ◀▶ Références
- ⊕⊕⊕ Cibles d'auscultation
- ⊕⊕⊕ Cibles doubles ou triples
- ★ Stations

tours, en définitive toutes les informations nécessaires à la réalisation d'un tour d'horizon le plus rigoureux possible. En parallèle, différents paramètres météorologiques sont également acquis. Tous ces éléments aboutissent à une robotisation du tachéomètre, l'ensemble des paramètres étant modifiable à distance à partir du centre de calculs. Ce qui s'applique à un appareil tel que décrit précédemment s'applique à la notion de groupe d'appareils, chaque appareil faisant ses acquisitions selon les mêmes principes.

La notion de groupe est utilisée au niveau des traitements, réalisés par moindres carrés et permettant de conduire un calcul global, assurant ainsi des déterminations correctes même si un appareil se situe dans la zone de mouvement et ne dispose pas de références fiables. L'idée consiste donc à relier plusieurs appareils entre eux par l'intermédiaire de cibles doubles ou triples, certains de ces appareils étant correctement référencés. Là aussi, différentes simulations ont été réalisées pour montrer la validité théorique du concept et donc convaincre nos interlocuteurs de la fiabilité du processus envisagé.

Le chantier a par la suite été décomposé en 23 groupes qui définissent 8 zones de calculs. La figure 3 explicite de manière théorique le concept de groupe : on voit aisément que la figure ainsi constituée est tout à fait calculable, ce n'est ni plus ni moins qu'un réseau s'appuyant sur quelques références stables. La difficulté principale réside dans la pondération nécessaire à un bon calcul par moindres carrés. Cette pondération et les contraintes associées aux cibles multiples ont fait l'objet de différents tests et ont montré l'importance vitale des cibles de référence.

Toutes ces installations fournissent donc de manière automatique leurs observations au centre de calcul. Il est clair que ce volume énorme de données doit être traité également de

manière automatique. Le logiciel de calculs utilisé, basé sur un outil de M. Yves Egels (IGN), a été lui aussi automatisé afin de faire que les personnels sur site aient à leur disposition des informations en sortie de calculs leur permettant de connaître l'état de fonctionnement de l'ensemble des machines, les anomalies éventuelles d'observations, les mouvements éventuels détectés, et nombre d'informations sur le déroulement du processus.

Toutes ces infos peuvent être visualisées par l'intermédiaire de Geoscope Web, développé par SolData, permettant de nombreuses manipulations sur les données et permettant surtout de disposer d'indications visuelles très utiles pour ceux qui exploitent les résultats.

La figure 4 montre un extrait à un instant donné d'un des secteurs du chantier. A titre anecdotique, lors de la première phase (comportement avant travaux), nous avons détecté un mouvement d'un immeuble, qui, après visite sur place, était du à des travaux indépendants de la construction de la ligne de métro. Ceci nous a conforté dans l'idée que le système fonctionnait correctement mais également a montré l'extrême sensibilité du secteur à ausculter.

Le système tel que le décrivent les pages précédentes fonctionne parfaitement, et fournit en temps réel (une mesure par heure fournie au client 24h/24 et 7j/7 pour les X,Y et Z de chacune des cibles). Néanmoins, quelques améliorations pourraient être envisagées, bien que contractuellement non nécessaires :

- D'une part, il serait intéressant de pouvoir disposer d'informations sur le comportement réel de certaines références.
- D'autre part, il serait utile de mieux connaître le comportement d'un groupe par rapport à ces voisins.

## Améliorations

Une des possibilités de mieux connaître le comportement de différentes références serait de leur associer une antenne GPS et de détecter, si possible, des mouvements éventuels.

Le problème majeur réside dans la précision que l'on peut espérer atteindre en installant un système totalement automatisable. Les quelques expériences d'ores et déjà tentées sur des sites tests montrent qu'actuellement, il n'est pas réaliste, principalement pour des raisons de coûts, d'espérer avoir des informations utilisables directement, étant donné le niveau de précision requis. Par contre, il n'est pas exclus que l'introduction de contraintes, dans le moteur de calculs, sur les lignes de base créées par l'installation de différentes antennes "solidifie" la relation entre différents groupes.

Ce constat s'applique également à la deuxième remarque relative aux relations inter groupes. La création de ces lignes de contraintes permettrait, en complément aux quelques éléments issus de cibles visées par différents groupes, de mieux connaître le comportement des entités les unes par rapport aux autres.

Une autre solution serait de disposer, idéalement à intervalles réguliers, d'interférogrammes radar sur la zone qui nous intéresse. L'exploitation des informations d'évolution que l'on peut extraire de ce type d'outils pourrait là aussi consister à faire évoluer les pondérations associées à certaines cibles de référence pour peu que leur mouvement soit correctement défini. Néanmoins, avant toute modification et nécessairement l'introduction d'un niveau de complexité plus important, il

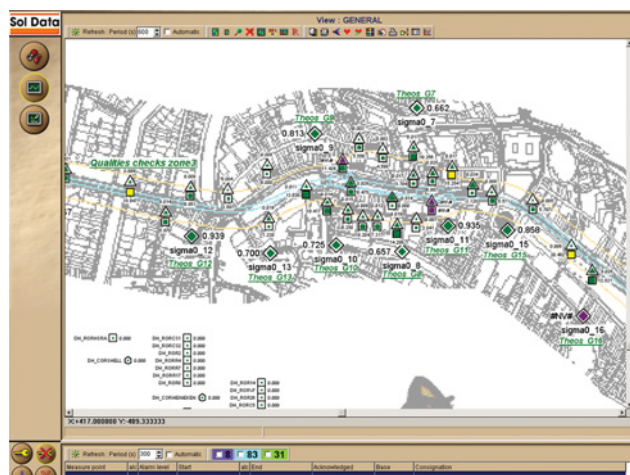


Figure 4 : extrait d'un écran Geoscope Web.

conviendra dans un premier temps de réaliser de nombreuses simulations, ne serait-ce que pour nous assurer d'une amélioration notable des résultats et de leur fiabilité.

Enfin, Il nous paraît important de préciser qu'actuellement des vérifications par topographie manuelle sont effectuées sur les cibles de références, permettant de répondre, bien qu'en différé (une fois tous les mois) aux deux questions posées ci-dessus. ●

## Contact

**Thierry PERSON** - Institut Géographique National  
Service de Géodésie et Nivellement - Unité des Travaux Spéciaux  
2, 4 avenue Pasteur 94165 Saint Mandé Cedex  
T : (33-1) 01 43 98 80 13 - F : (33-1) 01 43 98 84 50  
Mail : thierry.person@ign.fr

**Martin BETH** - SolData 294 Avenue G. Clemenceau 92 000 Nanterre  
T : (33 1) 41 44 85 00 - F : (33 1) 41 44 85 11  
Mail : martin.beth@soldata.fr

## ABSTRACT

**Key words :** topometry, monitoring, GPS, SAR interferometry

*In the late 90, the Amsterdam council decided to create a second subway line in the real old town center. This project needs a way to survey the old buildings and to secure all the operations during several years. For the tomopetric surveying, installed by SolData and IGN (special works department), one need reference points outside of the tunnelling impact zone. As this area is really difficult to determine, we are not sure of the stability of the reference points.*

*Even if for now the system works very well, we have to think about the global information we can extract from all the results we've got since the beginning of this work. One important fact is that we split the whole site in several zones : these sectors are calculated separately. So we need first to know how our reference points moves if they do and secondly we need to introduce a relation between the several groups treated separately for now. One way is perhaps to use GPS/total station, but another way is to use SAR interferometry.*



# Utilisation de plusieurs techniques de mesure pour enrichir une méthodologie

■ Alain MARTIN-RABAUD

*Les techniques de mesure 3D par procédés optiques sont restées pendant de nombreuses années les techniques privilégiées, voire exclusives, du monde de la géodésie. Depuis les années 1980, elles sont entrées dans l'industrie avec beaucoup de difficultés et de méfiance d'abord, pour s'imposer maintenant dans de nombreux domaines. Alors que les techniques de mesure 3D traditionnelles ne sont pas très coopératives entre elles, la force des mesures par procédés optiques provient de cette coopération qui permet d'allier les atouts de chacune des méthodes pour rendre le procédé plus adapté au besoin. La présentation de ces techniques n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais elle permet de donner un aperçu des méthodes, de leurs avantages et de leurs limites. Et comment, en associant plusieurs méthodes, il est possible de garantir le niveau d'incertitude requis.*

## Aperçu des techniques de mesure 3D utilisées dans l'industrie

La majeure partie des techniques de mesure 3D s'appuie sur un ensemble de capteurs élémentaires relativement conventionnels. Il s'agit essentiellement de capteurs de distance ou d'angle :

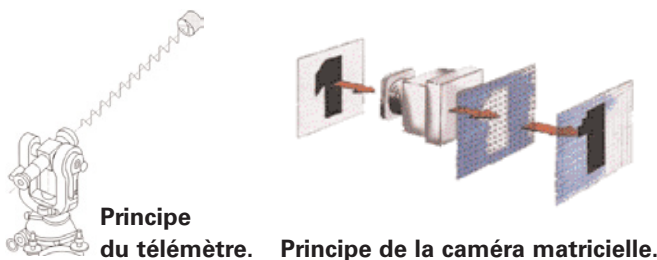
■ **Télémètre** : distancemètre utilisant un laser pour compter la durée du faisceau aller et retour entre le capteur et la cible (réflecteur ou cible naturelle) – il s'agit d'une mesure de distance absolue

■ **Interféromètre** : mesure du déplacement d'un réflecteur par analyse des franges d'interférence entre le chemin parcouru par un faisceau de référence et le réflecteur mobile – il s'agit d'une mesure relative de la distance, qui nécessite une mesure en continu (toute rupture de la mesure impose de repartir de la référence)

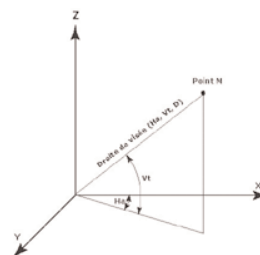
■ **Codeur angulaire** : mesure angulaire par relevé sur un cercle optique, avec calcul d'interpolation entre plusieurs séries de graduation

■ **Caméra linéaire** : mesure angulaire par utilisation d'une optique classique ou cylindrique et d'un capteur CCD ne comprenant qu'une ligne

■ **Caméra matricielle** : identique à la caméra linéaire, mais avec un capteur CCD matriciel



A partir de ces différents capteurs élémentaires, la mesure 3D est effectuée par composition selon deux principes :



■ **Calcul polaire** : Il s'agit de la composition de deux mesures d'angle ( $H_a$  et  $V_t$ ) et une mesure de distance ( $D$ ) selon la formule ci-contre.

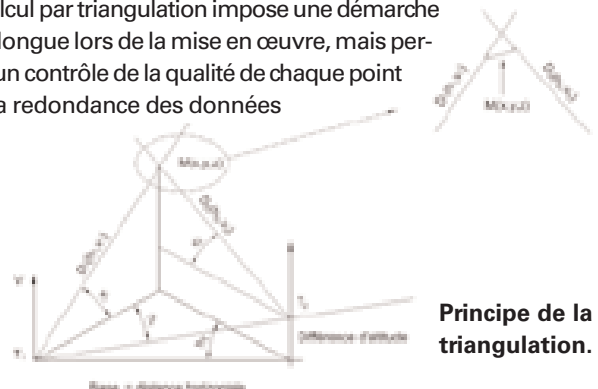
$$\begin{aligned} X_i &= D \cdot \cos(H_a) \cdot \cos(V_a) \\ Y_i &= D \cdot \sin(H_a) \cdot \cos(V_a) \\ Z_i &= D \cdot \sin(V_a) \end{aligned}$$

La détermination des coordonnées est immédiate, mais il n'y a pas de vérification de la qualité de la mesure

■ **Calcul par triangulation** : Seules des mesures angulaires sont réalisées, ce qui impose une procédure de détermination du processus de mesure en deux étapes :

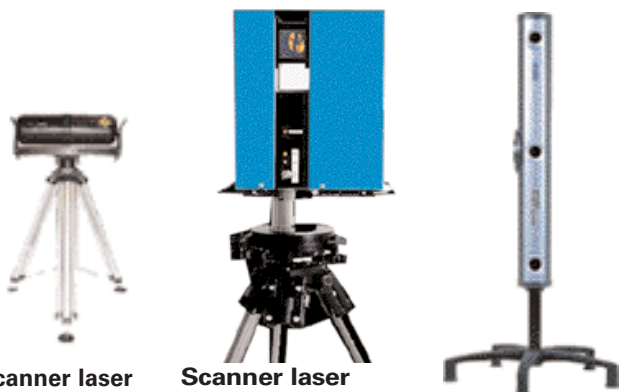
- L'orientation relative qui détermine la position des appareils entre eux par la visée réciproque des appareils entre eux (possible uniquement avec les théodolites), soit en visant des points homologues (ajustement de faisceaux des droites de visées).
- Puis la phase de mise à l'échelle qui est réalisée généralement par la visée sur des règles étalons, mais peut se faire aussi sur des points connus préalablement.

Le calcul par triangulation impose une démarche plus longue lors de la mise en œuvre, mais permet un contrôle de la qualité de chaque point par la redondance des données









Scanner laser  
TRIMBLE S25.

Scanner laser  
IMAGER 5003 de  
Zoller+ Fröhlich.

Capteur de vidéo-  
grammétrie de NDI.

■ ■ ■ ■ **Les scanners lasers** : A l'inverse des lasers de poursuite, les scanners lasers ne sont pas des appareils de mesure d'un grand niveau d'exactitude, mais plutôt des appareils utiles pour mesurer des grandes quantités de points.

Deux familles d'instruments peuvent être distinguées :

- Les scanners lasers à base de triangulation, qui sont historiquement les plus anciens
- Les scanners lasers polaires, qui sont des tachéomètres à grande cadence d'acquisition

Ces deux familles d'instruments sont très différentes au niveau de la conception, mais le traitement des points est ensuite très proche, du fait du grand nombre de points.

**Les scanners lasers par triangulation** : Le principe de base de ces scanners est de réaliser un calcul de triangulation entre un laser qui émet soit un faisceau linéaire ou plan et une caméra qui perçoit la position de l'impact de ce faisceau sur l'objet. Dans le cas où le faisceau est uniquement linéaire et que la caméra est aussi linéaire, le plan de triangulation nécessite l'adjonction d'un troisième capteur (un codeur angulaire) pour obtenir la troisième donnée nécessaire à la détermination des points en 3D. Si le faisceau est plan, la caméra sera matricielle et les données seront directement traduites en coordonnées 3D. Les caractéristiques de ces instruments sont très variables, du fait que la géométrie de l'instrument (avec, en particulier, la base de triangulation) est essentielle sur ces données :

- L'incertitude spatiale est de l'ordre de 1 mm à 10 m
- La cadence d'acquisition est de l'ordre de 100 points/s
- L'étendue de mesure est de l'ordre de 0,8 à 25 m

Les principaux fabricants de ce type de scanner sont KONICA et TRIMBLE.

**Les scanners lasers polaires** : Comme indiqué plus haut, ce sont des tachéomètres dont la technologie des capteurs élémentaires a été modifiée pour obtenir des cadences d'acquisition bien supérieures :

- Le codeur angulaire est souvent un codeur galvanométrique
- Le distancemètre, bien que reposant sur le même principe de mesure par temps de vol d'une onde lumineuse, permet une fréquence d'acquisition très rapide, pour des mesures sur cible naturelle.

De ce fait, les spécifications de ces capteurs sont les suivantes :

- Incertitude angulaire de l'ordre de 24 à 50  $\mu$ rad
- Incertitude en distance de l'ordre de 3 à 12 mm
- Cadence d'acquisition de 1 à 2 kHz

Les principaux constructeurs de ces capteurs sont CALLIDUS,

LEICA, RIEGL, TRIMBLE et Zoller+Fröhlich. Les principales applications de ces scanners concernent les grandes installations industrielles pour établir les plans tels que construits, l'architecture et l'archéologie.

■ **La photogrammétrie et la vidéogrammétrie** : Ces deux méthodes de mesure 3D reposent sur la même technique de base : l'acquisition d'images par un procédé conventionnel (support argentique) ou numérique, puis le traitement des mesures par calcul de triangulation.

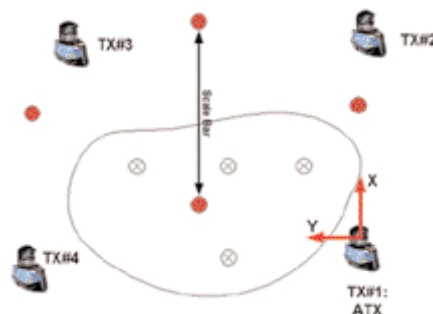
Depuis les années 1990, la photogrammétrie est devenue essentiellement numérique pour les applications industrielles, ce qui impose de travailler sur cibles rétro-réfléchissantes. Le temps de saisie et de traitement a incité les fabricants de capteurs à proposer des solutions en temps réel, que l'on nomme souvent des systèmes de vidéogrammétrie, où la cible dite passive est remplacée par une cible active, c'est-à-dire qu'elle s'éclaire automatiquement à la demande du logiciel de pilotage du système de vidéogrammétrie, pour différencier plus facilement chacun des points mesurés. Souvent aussi, ces systèmes de vidéogrammétrie sont proposés sous forme d'un capteur complet étalonné. La qualité de la mesure et surtout le niveau d'incertitude atteint dépendent très fortement d'un grand nombre de paramètres qui sont variables d'une application à l'autre ; en effet, un des intérêts de ces méthodes (comme les méthodes de triangulation par théodolite) provient de leur grande flexibilité : la disposition des capteurs, le nombre de capteurs utilisés, la méthode d'étalonnage... seront choisis selon l'objet à mesurer et les caractéristiques recherchées.

Les principales généralités que l'on peut donner en matière de caractéristiques sont les suivantes :

- Incertitude d'un point 3D sur l'objet : de l'ordre de  $10^{-5}$  par rapport à la distance à l'objet
- Etendue de mesure : de 0,5 m à 1 000 m (voire au-delà dans les applications de cartographie)

Les principaux fabricants de ces moyens de mesure sont : ActiCM, AICON, GOM, GSI, IMETRIC, KRYPTON, METRONOR, NDI. Les applications sont très importantes, depuis le relevé 3D de grandes installations jusqu'aux essais en dynamique de produits manufacturés (portes, tiroirs...).

■ **GPS intérieur (GPS Indoor)** : Il s'agit d'un type de mesure très nouveau, qui repose sur l'idée des positionnements par satellites (GPS, Galileo), bien que s'appuyant sur la triangulation et non pas la trilatération des systèmes par satellites. Le principe repose sur l'installation de capteurs dits satellites (pour respecter l'analogie) qui émettent des faisceaux lasers plans dans toutes les directions. Une procédure d'initialisation



Disposition des satellites pour le GPS Indoor.



**Exemple d'application du GPS Indoor dans l'industrie aéronautique.**

(l'orientation relative et la mise à l'échelle de la triangulation) est nécessaire lors de l'installation de ces satellites. Et des moyens de vérification régulière sont installés pour que ce système soit contrôlé en permanence sur le site où il est installé.

Les mesures sont réalisées au moyen de palpeurs qui interceptent les faisceaux lasers et dès que le nombre suffisant de satellites est intercepté, la mesure 3D est accessible. Le seul fabricant identifié à l'heure actuelle est ArcSecond. Ce principe a pour avantage de mettre à disposition d'un ensemble de contrôleurs qui travaillent dans le même bâtiment, un moyen de relevé 3D, dont le niveau d'incertitude semble particulièrement prometteur puisque les constructeurs annoncent une incertitude de l'ordre de 0,15 mm pour un volume de 10 x 5 x 3 m, avec une cadence d'acquisition de 70 à 100 Hz. Les applications sont limitées, pour l'instant, aux grandes installations industrielles comme l'automobile, l'aéronautique où les besoins en relevé 3D sont importants et multiples, ce qui autorise ce type d'investissement qui reste encore lourd.

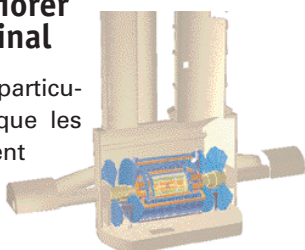
## Combinaison de plusieurs techniques de mesure 3D pour améliorer le niveau d'incertitude final

Lors d'applications industriels particulières, il est souvent constaté que les méthodes de mesure 3D peuvent avoir des limites tant sur le niveau d'incertitude, que sur la faisabilité ou le temps nécessaire pour l'opération proprement dite. De **Caverne ATLAS de l'accélérateur LHC du CERN**, ce fait, il est courant que l'on combine un certain nombre de techniques de mesure 3D pour correspondre au mieux au besoin exprimé.

Les objectifs les plus courants correspondent à :

- L'amélioration du niveau d'incertitude final de l'opération
- L'optimisation de la durée et/ou des coûts de l'opération
- La simplification du traitement des données pour définir le mesurande final

Un exemple de ce type de travail est présenté ici : il s'agit du relevé 3D d'une caverne du nouvel accélérateur de particules du CERN (dimensions : longueur 60 m, largeur 40 m, hauteur 35 m). L'objectif de ce relevé consiste à obtenir le modèle réel



de la caverne, y compris tous les points d'ancrage des éléments de l'expérience à installer, pour définir un scénario de maintenance des équipements le plus adapté et le plus fiable possible. L'incertitude de la représentativité du modèle doit être inférieure à 10 mm, sachant que les points d'ancrage doivent être connus à 5 mm. Le principe de mesure retenu est le suivant :

- Numérisation globale à l'aide d'un scanner laser GS100 de TRIMBLE
- Raccordement et relevé des points caractéristiques (les points d'ancrage des équipements) à l'aide d'un tachéomètre LEICATCRA1101+
- Le raccordement entre les deux systèmes de mesure est réalisé à l'aide de sphères, relevées par le tachéomètre. 1 mm.

Le bilan présenté ci-contre montre le gain sur l'incertitude de modèle construit sans recours à une autre méthode de mesure que le scanner laser par rapport à la méthode choisie. On remarque que dans ce cas présent, le gain est très important puisque l'incertitude finale est divisée par deux. Cette démarche a permis aussi de réaliser ce relevé en un temps remarquable : une seule journée pour relever 10 millions de points.

Bilan des incertitudes	
Sans recalage par tachéomètre	
• Scanner : 7 mm en moyenne	
• 3 stations :	
- Sphères de recalage : 3 mm	
- Point courant : 7 mm	
- Bilan sur les points de l'ensemble du maillage : 13,2 mm	
Avec recalage par tachéomètre	
• Scanner : 7 mm en moyenne	
• Tachéomètre :	
- Recalage : 1 mm	
- Relevés des sphères : 1 mm	
• 3 stations :	
- Sphères de recalage : 3 mm	
- Point courant : 7 mm	
- Bilan sur les points de l'ensemble du maillage : 7,8 mm	

## Conclusion

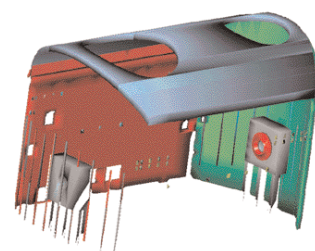
En final, il faut noter que les industriels disposent à l'heure actuelle d'un nombre très important de moyens de mesure 3D.

Lors de l'analyse d'un besoin, il est important d'identifier les caractéristiques à atteindre pour faciliter le choix des moyens de mesure : en effet, l'optimisation de ces moyens et éventuellement leur combinaison permet un gain très important sur les performances tant en termes d'incertitude que de temps de mesure et de traitement, avec, comme paramètre supplémentaire à surveiller, le coût d'investissement ou de location, selon le cas. Cette démarche est même à l'heure actuelle prise en compte par les constructeurs puisque l'on voit apparaître des instruments qui combinent plusieurs méthodes de mesure 3D, comme le laser de poursuite de LEICA, le LTD800 associé aux T-Scan (scanner laser) et T-Probe (outil 6D). ●

## Contact

**Alain MARTIN-RABAUD**

Métride s.a. 444, rue des Jonchères – 69730 GENAY (France)  
Téléphone : 04 72 08 77 77 – Fax : 04 72 08 77 79  
email : info@metride.fr – Site Web : www.metride.fr



**Modèle CAO issu de la numérisation de la caverne ATLAS.**



**Laser de poursuite LEICA LTD800 et le scanner T-Scan.**



*Lors du forum Topographie de l'AFT le 17 mars 2005, un créneau dans l'emploi du temps a été proposé à deux fournisseurs de matériel pour présenter leurs produits nouveaux, en rapport avec le thème de la journée : GPS et tachéomètres. Les deux constructeurs, Trimble et Leica, ont insisté sur les évolutions actuelles de leurs matériels permettant un emploi combiné de plus en plus facile du GPS pour la polygonation et du tachéomètre pour le lever. Chez Trimble, l'effort a été mené vers une facilitation très poussée de l'emploi successif des appareils sur un même point, chez Leica la nouveauté portait sur la toute nouvelle intégration du GPS dans le tachéomètre. Les deux brèves présentations qui suivent retracent ces interventions.*



De gauche à droite : M. CABANEL Trimble et M. KADDED Leica.

## L'intégration complète du GPS et d'un tachéomètre : le SmartStation de Leica

*Lors du colloque de l'AFT, Leica Geosystems a présenté une innovation dans le monde de la topographie : une station totale avec un récepteur GPS intégré, pour un coût très nettement inférieur à celui des deux appareils séparés.*

Grâce à cette innovation, le géomètre peut maintenant effectuer des levés de détails sans matérialiser de points de références au sol. La souplesse est largement accrue : l'utilisateur peut s'installer n'importe où, même sur un chantier sans références externes, et son relevé sera rattaché grâce au GPS. Avec cette avancée, les points de référence peuvent devenir virtuels, ce qui représente une économie de temps considérable lors de la mise en station. Le principe est simple, et ouvre de toutes nouvelles possibilités, en particulier si le chantier se déroule sans éléments d'orientation externes connus. Sur le terrain une brigade s'installe dans un endroit propice au levé topographique et à la réception GPS. On mesure une première position GPS et ensuite le levé tachéométrique débute. Afin d'orienter le levé terrain on positionnera ensuite le tachéomètre sur un (et afin de disposer de contrôles efficaces, plusieurs) des points visés auparavant : leur positionnement GPS permettra alors d'orienter l'ensemble du lever.

### Description de la SmartStation :

- Un tachéomètre série 1200 (TPS 1200)
- Un bloc de réception GPS monobloc incluant l'antenne qui se fixe à la place de la poignée du tachéomètre.
- Un module de communication (Radio UHF ou Modem GSM) permettant la réception en temps réel de signaux de correction GPS.

### Il existe deux principales méthodes d'orientation :

- Entre plusieurs stations qui sont déterminées par GPS.
- Sur un (et préférentiellement plusieurs) point connu. Il devient ainsi possible de se passer d'intervisibilité entre stations suc-



cessives. Si le praticien continuera sans doute à parler de polygonales, c'est en fait un terme qui sera devenu assez loin de la réalité technique !

### Exemples d'utilisation

Ce nouveau matériel trouve toute sa dimension et son utilité dans le cas :

- De levés à rattacher en zone urbaine ou semi-urbaine. L'outil GPS ne permet pas de lever les bâtiments, mais il sera toujours possible de déterminer une station sur un lieu assez dégagé pour le GPS d'où des visées seront ensuite lancées vers les détails du bâtiment.
- Dans des zones où aucun point connu n'est disponible et où il est nécessaire de faire un levé de détails précis.

Il s'agit donc de la phase d'intégration finale des deux outils les plus puissants auxquels le géomètre a désormais accès, le tachéomètre et le GPS : aucun des deux n'a détrôné l'autre, mais leur intégration complète va ouvrir de nombreuses nouvelles portes. Des tactiques innovantes d'organisation du travail de terrain sont maintenant à imaginer pour tirer pleinement profit de cette situation sans précédent... ●

# Stations Totales Optiques et GPS : la "Topographie Intégrée" chez Trimble

■ Jean-François CABANEL

*L'article résume les avancées technologiques les plus récentes dans le domaine des stations totales optiques et GPS, de saisie de données informatisées de terrain, des systèmes de communications qui concourent au gain de productivité, précision plus élevées des données, meilleur contrôle de la qualité, plus grande simplicité d'utilisation et accroissement de la sécurité. Il met en avant le fait que les capteurs et autres composants autrefois séparés s'interconnectent pour se fondre dans des solutions topographiques totales.*

## ■ mots clés

Technologie, productivité, mobilité, GPS, stations totales optiques, Topographie Intégrée, communications

**F**ace aux exigences du marché actuel, les géomètres sont perpétuellement à la recherche de solutions leur permettant d'accroître leur productivité et leur rentabilité. La notion de topographie intégrée est donc d'une grande importance, puisqu'il s'agit de la capacité à utiliser l'outil le mieux adapté pour une tâche donnée tout en disposant d'une compatibilité et d'une intégration totales des données d'autres provenances. Les stations totales Optiques et GPS Trimble font partie du concept général "Topographie Intégrée" dont les solutions technologiques optimisent les informations de mesures et positionnements pour améliorer la productivité, le contrôle et la qualité des données, en minimisant les connexions grâce à l'emploi de liaisons Bluetooth. On constate qu'en un laps de temps très bref, le géomètre a su tirer 5 types d'avantages fondamentaux des remarquables innovations de la technologie: le gain de productivité, le meilleur contrôle de la qualité des données, la précision plus élevée des données, la plus grande simplicité d'emploi des équipements et l'accroissement de la sécurité.

Les avancées technologiques des Stations Totales Optiques se sont traduites dans les années 1990 par l'introduction par Geotronics du premier système "1 seule personne" – commande de la station à distance – si bien que le système robotisé constituait alors un exemple parfait de regroupement de composants divers au sein d'une solution topographique intégrée, améliorant de façon significative la productivité. Le concept actuel de la Topographie Intégrée offre le choix du contrôleur de terrain et du logiciel d'applications, assurant les mesures avec le GPS et le tachéomètre, passant de l'un des capteurs à l'autre. Ainsi, voyons quelques situations typiques :

■ **CAS N°1 : terrain couvert par une infrastructure GPS en réseau, favorable à la réception des satellites, le géomètre (bénéficiant du service fourni par le gestionnaire du réseau) souhaite exécuter des tâches de levés.**

Un GPS RTK est mis en place rapidement sur une canne (de la même façon qu'un utilisateur y place son prisme). S'approchant par exemple de zones bâties, il peut décider de



**Base GPS Trimble R8 émettant les corrections par radio, 100% sans câble**

lever des points avec une qualité "point de contrôle" qui serviront de points de référence pour la mise en station et orientation d'une station totale optique; en effet, la même unité de contrôle et donc la base de données du projet peut être utilisée pour travailler aussitôt après avec une station totale optique ; celle-ci sera placée dans un endroit optimisé en fonction du travail requis – cela peut être de façon à se positionner avec la meilleure géométrie possible en fonction de points de référence précédemment déterminés en GPS pour optimiser le calcul de la mise en station (stationnement libre par exemple sur quatre points de contrôle ou plus si nécessaire), à rayonner le plus de points, le tout en plaçant l'appareil dans un endroit le moins exposé (circulation, sécurité).

Dans le cas où deux topographes se partagent les tâches de terrain, l'utilisateur du GPS RTK peut transférer des points et autres informations du chantier à son collègue en charge par exemple de travaux d'implantation ou autres levés en mode Optique





**Mobile GPS RTK en action**

Robotique, directement sur le terrain grâce au système intégré de communications sans fil Bluetooth.

■ **CAS N°2 : terrain non couvert par une infrastructure réseau et RTK requis : nous sommes dans le cas habituel où la Base est nécessaire avec transmission des corrections via système de communication tel que radio, GSM/GPRS.**

**Exemple 1 :** en fonction Base, un récepteur GPS RTK avec radio interne est fixé sur un trépied (à noter que cette Base peut devenir Mobile dès lors que le géomètre se retrouve dans une zone couverte par le réseau). En fonction Mobile, un récepteur GPS RTK fixé sur une canne capte les corrections RTK transmises par la radio.

**Exemple 2 :** Le géomètre ne souhaite pas installer un récepteur GPS en fonction Base, il choisit de recevoir les corrections en provenance d'une station permanente qui émet elle-même en radio et/ou GSM/GPRS ; il opère avec son Mobile recevant les corrections RTK transmises via radio et/ou GSM/GPRS via son téléphone cellulaire.

■ **CAS N°3 : terrain non couvert par une infrastructure réseau et RTK non requis :**

Le géomètre exécutera des calculs de post-traitement au bureau en bénéficiant des données enregistrées par les stations permanentes (téléchargement via Internet, par exemple sur le RGP de l'IGN).



Sur le terrain, en temps réel, communications de données entre "l'opérateur GPS" et "l'opérateur Station Robotique", sans fil, via Bluetooth intégré dans l'interface TCU.

Toutes les fonctions, quelles soient GPS ou optiques, sont manipulées par la même interface de commande, et toutes les données sont intégrées de façon cohérente dans un seul fichier, celui du chantier en cours. Ceci signifie simplement un contrôleur, un logiciel, une interface et un fichier de travail. Il suffit de détacher le contrôleur du GPS, puis de le fixer sur la station totale ou sur le support robotique, en restant fidèle aux attentes des utilisateurs en terme d'exigences de performance, fiabilité, compacité, légèreté, autonomie, facilité et rapidité de mise en œuvre, le tout favorisant la mobilité et permettant d'accroître leur productivité.

Les possibilités de connexion à Internet offertes par le système d'exploitation Windows CE présentent plusieurs avantages de premier ordre sur le terrain. Les topographes sont d'abord en mesure de transmettre des données au bureau par la messagerie électronique aux fins de contrôles de qualité étendus, d'où une meilleure assurance de la qualité et une réduction des besoins en reprises éventuelles. Les géomètres peuvent ensuite accéder à des fichiers sur le site Internet de leur entreprise - par exemple des points d'appui, des fichiers de géoïde, des cartes d'arrière-plan ou des codes d'identification - réduisant ainsi les temps d'immobilisation. Et enfin, des équipes évoluant sur des sites différents sont désormais en état de communiquer entre elles.

Le développement des logiciels de bureau a également eu pour objectif de rendre les systèmes topographiques plus faciles d'emploi en simplifiant les flux de données entre les systèmes de terrain et de bureau.

L'ensemble des technologies converge vers une intégration de plus en plus poussée des systèmes permettant à toutes les parties prenantes d'un même projet d'accéder en temps réel aux données relatives à leur domaine de compétence. Une occasion unique se profile par conséquent pour les topographes pour peu qu'ils veuillent bien assumer la gestion des flux de données des projets, de leur conception à leur réalisation. ●

## Contact

**Jean-François CABANEL**

Trimble France SAS, Engineering & Construction Group  
32 rue de la Fontaine du Vaisseau, 94120 Fontenay-sous-Bois  
tél : 01 7134 3173, fax : 01 7134 3199  
Courriel : jean-francois\_cabanel@trimble.com

## ABSTRACT

*This article sums up all the recent technological improvements achieved with Optical Total Stations, GPS, computerized data processing systems, enhanced communications systems all together that allow gains of productivity, higher data accuracy, improved quality control, simplified use and increased security. The article underlines the fact that the sensors and other components that used to be separated are now interacting in order to offer a full surveying solution.*

## Vers une Géomatique participative

■ Stéphane ROCHE

*L'un des enjeux actuels de la géomatique consiste à faciliter l'accès et l'usage de l'information géographique pour le grand public. Les Public participation GIS ("Public Participation Geographic Information Systems" - PPGIS) constituent les réponses les plus actuelles à ce problème. Pourtant, les bases conceptuelles et méthodologiques nécessaires pour développer des solutions PPGIS réellement efficaces font défaut. Une équipe de Centre de recherche en géomatique à l'Université Laval développe à cette fin un programme de recherche articulé autour de trois axes : conception des bases épistémologiques des PPGISciences, formalisation d'un cadre de développement et d'évaluation des PPGISystèmes, et développement et tests de solutions PPGITechnologies innovantes et efficaces.*



### Éléments de contexte : géomatique et société de l'information

La recomposition actuelle des territoires (intercommunalité, fusions municipales...) et l'entrée croissante des pays occidentaux dans la société de l'information redessinent les pratiques de gestion des territoires et les cadres de gouvernance. Progressivement, les logiques de raisonnement sectoriel à court terme s'effacent au profit d'une logique de projet de territoire durable. La nécessité de mettre en œuvre des démarches participatives, incluant les citoyens, s'impose aux gouvernements et aux États. Ces derniers, contraints de mobiliser toujours plus d'information, d'en favoriser le porter à connaissance et de trouver des solutions technologiques socialement acceptables, se tournent vers les Technologies de l'Information (TI). Dans ce contexte, la diffusion croissante des Technologies de l'Information Géographique (TIG) dans leur forme traditionnelle (Systèmes d'Information Géographique (SIG), base de données, cartographie numérique...), mais surtout dans leurs déclinaisons légères et mobiles (cartographie sur le Web, GPS légers et tablettes PC...), multiplie les possibilités d'accès à l'information géographique (les cartes en particulier) par un public non professionnel

(le citoyen impliqué dans la vie locale), dans des champs d'application élargis (aménagement, loisir, élection, participation locale...).

Mais, l'accès et l'adoption de l'information géographique autant que son usage au service d'approches participatives, s'ils posent des défis sociétaux grandissants, questionnent également la communauté scientifique. Celle des sciences de l'information géographique se mobilise par exemple depuis une décennie pour mieux comprendre la nature des interactions entre science-technologie et espaces-sociétés (Cury 1998, Pickles 1995, Roche 2000, Roche & Caron 2004, Sheppard et alli 1999) et pour proposer des solutions conceptuelles, méthodologiques et technologiques adaptées (Jankowski & Nyerges 2001, Laurini 2001). Pourtant, des difficultés majeures persistent : difficultés à mettre en œuvre des modèles d'accès limitant les phénomènes de marginalisation et d'exclusion ; difficultés à faire de ces TIG de réels vecteurs de partage des connaissances et des savoirs géographiques, aptes à supporter les démarches participatives.

Le programme de recherche développé par l'équipe SOS-IG (<http://sos-ig.scg.ulaval.ca/>) au sein du centre de Recherche en Géomatique à l'Université Laval tente précisément

d'apporter des éléments de solution à ces problèmes. Ce programme se positionne à la croisée disciplinaire des sciences sociales et des sciences géomatiques. Il propose de formaliser un corpus conceptuel et théorique de connaissances visant à concevoir un cadre d'évaluation et de développement générique de solutions géomatiques participatives.

Un "Public Participation GIS" peut se définir comme un système d'information couplé à un dispositif participatif :

- mobilisant des informations géographiques et/ou des technologies géomatiques ;
- développé en partie par (et pour) le public (des individus, des groupes locaux...) ;
- dans le but de favoriser la participation du public dans les processus de gestion territoriale locaux (collecte de données, opérations de cartographie, analyses spatiales, décision territoriale...).

Cet article n'a pas pour objectif de présenter des résultats de recherche formel. Il vise essentiellement à faire le point sur les questions posées par le développement des PPGIS (section 2), puis à expliciter le programme de recherche développé par l'équipe SOS-IG pour apporter des réponses à ces problèmes (section 3).





## ■ ■ ■ Le problème posé : les "Public Participation GIS"

Un enquête récente (Craig et alii. 2002) met en évidence la dynamique très forte qui entoure actuellement les PPGIS. Les résultats montrent la grande variété d'initiatives tant sur le plan de l'impulsion, que de la thématique ou de la démarche, des outils et de l'information mis en œuvre. L'étude recense plus d'une centaine d'organisations (aux Etats-Unis en particulier) contribuant directement à la participation du public dans les processus de décision territoriale au sein des communautés locales, en mettant à leur disposition des données à caractère géographique et des supports méthodologiques et technologiques adéquats. Cette étude impose deux constats.

Le premier concerne les contextes de développement des PPGIS. Il rejoint les constats d'une autre étude (Roche et alii 2003) qui montre combien ce développement est conditionné par les caractéristiques socio-spatiales, politiques, culturelles du contexte local. Il faut en effet d'emblée préciser le caractère très particulier de leur mise en œuvre. L'écrasante majorité des expériences PPGIS concerne trois types de contextes :

- des quartiers urbains défavorisés, ou connaissant de grandes difficultés sociales, et donc des communautés marginalisées;
- des contextes de fortes controverse environnementale au sein desquels des mouvements de défense de la nature, des groupements écologistes développent des solutions de type PPGIS;
- les contextes des pays en voie de développement au sein desquels des ONG développent ce type d'initiatives. Dans ces trois cas, une hypothèse positiviste est posée, le recours aux technologies géomatiques doit permettre à des communautés, des groupes sociaux voire des causes, de s'exprimer et d'être entendus.

Le second concerne certains des concepts de base des PPGIS. Celui de communauté locale tout d'abord, qui fait référence à des ensembles d'individus voisins (au sens géographique du terme), partageant des centres d'intérêt et des expériences, des "grassroots

communities" par exemple. Ces communautés peuvent prendre des formes variables (plus ou moins organisées et structurées), leur permettant d'agir comme des interlocuteurs obligés des administrations et collectivités locales. Aussi le concept de participation publique mobilisé dans les PPGIS renvoie-t-il à l'engagement local de ces communautés, à leur implication dans les réflexions et les actions de gestion et d'aménagement de leur territoire. Pour les y aider, les démarches PPGIS consistent à intégrer les connaissances locales de ces communautés dans la production et l'usage des SIG. Il s'agit ainsi d'assurer à ces communautés un accès facilité aux ressources informationnelles et technologiques, voire de les rendre acteurs à part entière des processus de développement des SIG, lesquels doivent être pensés et conçus de façon participative, de manière à s'insérer ensuite au mieux dans des processus de gestion locale participatifs.

Les initiatives PPGIS sont nées dans la continuité des débats et des travaux de recherche, lancés au milieu des années 1990, autour de la critique des SIG (Pickles 1995, Schuurman 2000). Dans le prolongement de ce courant critique qui perdure encore aujourd'hui, des alternatives furent alors proposées pour favoriser la production, l'accès et l'usage de l'information géographique par le plus grand nombre. On entendit d'abord parler de GIS2, appellation qui renvoyait à l'idée d'un 'bottom-up GIS'. Puis dans le cadre des travaux de l'initiative 19 du NCGIA aux Etats-Unis, le concept de "Public Participation GIS" fut développé. Ce courant critique posait différents constats :

- le positivisme et le caractère hégémonique des relations de pouvoir incluses de façon sous-jacente dans les SIG et leur mode de développement et d'usage;
- le caractère anti-démocratique des SIG, le plus souvent conçus par et pour les usages des administrations et institutions, sans qu'aucun cas ne soit fait des capacités fortement différenciées d'accès aux informations ainsi collectées et gérées;
- et le renforcement par l'intermédiaire des SIG d'une vision technocratique

de l'espace et de sa gestion, accentuée par la standardisation, la normalisation des représentations et des modèles territoriaux produits.

Dans les faits, le concept de "Public Participation GIS" renvoie à des réalités différentes selon les structures de communication (radiale, réseau...) mises en œuvre, la nature des interactions avec le SIG (usage direct, passif, actif...), la localisation du SIG (virtuelle, interne, externe...), la nature des acteurs impliqués (privés, ONG, institutions, universités,...), ou encore selon la façon dont sont gérées les questions légales et éthiques liées à l'usage des TIG et de l'information associée (propriété/responsabilité, accès données publiques, vie privée...). A partir de ces variables, et basés sur des études et observations empiriques, six modèles de développement de PPGIS sont identifiés dans la littérature: Community-based (in-house) GIS, University-Community partnerships, GIS facilities in universities and public libraries, "Map Rooms", Internet Map Servers et Neighbourhood GIS centre. Dans la pratique, il y a souvent croisement des modèles et ces derniers ne sont pas mutuellement exclusifs. Par ailleurs, dans la plupart des cas, la réussite de l'opération est grandement liée au soutien des organisations territoriales locales (administrations ou collectivités), ou bien à l'implication d'un acteur externe apportant l'expertise qui fait souvent défaut (un laboratoire universitaire). Enfin, ces PPGIS ne peuvent réellement être développés que dans des contextes où les citoyens sont organisés en communautés locales, poursuivant des buts communs et s'inscrivant dans des logiques constructives proactives et pas seulement réactives ou militantes.

Reste que dans cette dynamique, une véritable communauté de praticiens et de scientifiques s'est formée... les forums se multiplient sur l'Internet et la troisième édition de la conférence internationale dédiée aux PPGIS a eu lieu à l'Université du Wisconsin-Madison en juillet 2004, sous l'égide de URISA, des numéros spéciaux des revues Cartographica, Journal of URISA ou encore des Annals of AAG ont été consacrés aux PPGIS. Certains cher-

cheurs (Tulloch, Sieber, Carver, etc.) défendent même l'idée d'une véritable PPGIScience. (<http://www.crssa.rutgers.edu/ppgis/>)

Pourtant, et malgré la multiplication des initiatives PPGIS, des difficultés majeures persistent. La nature de la démarche de participation influence grandement le fonctionnement du dispositif, et la capacité des individus à accéder aux ressources ainsi constituées. De l'aveu même des principaux promoteurs des démarches PPGIS, si les enjeux sociaux autant que scientifiques sont extrêmement motivants, l'enthousiasme flottant autour de ces initiatives est bien souvent mis à mal par les difficultés de développement, de mise en œuvre et d'usage de ces dispositifs en situation réelle. C'est sans doute ce qui explique que la grande majorité de ces initiatives soit encore très souvent expérimentale et portée par des universitaires. Quoi qu'il en soit, les problèmes fondamentaux auxquels les PPGIS étaient supposés apporter des solutions ne sont que très partiellement réglés.

Les études de cas très nombreuses réalisées à ce jour mettent par exemple clairement en évidence l'existence d'un double effet de marginalisation/intégration (empowerment) sur les populations socialement et culturellement différenciées. D'ailleurs ces études de cas montrent sans ambiguïté combien les expériences PPGIS sont sensibles aux contingences locales (institutionnelles, sociales, politiques, géographiques, technologiques). Par ailleurs, les technologies qui supportent aujourd'hui les initiatives PPGIS demeurent les mêmes que celles qui supportaient les SIG traditionnels (tant décriés pourtant par le courant critique qui a fait naître les PPGIS). Ainsi, les interfaces à l'utilisateur sont-elles le plus souvent toujours aussi difficiles à "pénétrer" pour un utilisateur non averti. Les modèles de données et les métaphores spatiales utilisés pour organiser et représenter les données géographiques dans les PPGIS sont les mêmes que ceux auxquels on avait recours traditionnellement pour les SIG. La représentation autant que l'analyse qualitative de phénomènes spatiaux non physiques

sont toujours aussi difficiles et limités, alors qu'ils correspondent pourtant à des besoins réels et clairement identifiés (Carver 2003). On peut sans trop s'avancer affirmer que les difficultés proviennent pour l'essentiel du fait que l'on essaie de faire du "neuf", du "différent" avec du "vieux".

Force est de constater que si les PPGIS n'atteignent que très partiellement leurs objectifs, c'est en partie le fait d'un manque crucial d'innovations qui les accompagnent (plus méthodologique et théorique que technologique d'ailleurs). Nous considérons que les PPGIS ne constitueront un support réel et efficace à la participation territoriale qu'à la condition qu'ils soient conçus et développés sur un cadre théorique, conceptuel, méthodologique et technologique renouvelé. Pour ce faire l'équipe SOS-IG développe une approche de recherche éclectique (géomatique cognitive, aide à la décision, sociologie, technologie de l'information) de façon à cerner de manière plus large les problématiques du raisonnement spatial (y compris qualitatif) nécessaire pour appuyer la participation publique et l'intégration des connaissances locales.

## Les solutions en cours de développement

La difficulté actuelle pour évaluer les effets et l'efficacité des PPGIS tient à la relative jeunesse de ces dispositifs d'une part, et à leur caractère encore expérimental, d'une autre. Selon Craig et alii (2002), il existerait trois niveaux d'évaluation du succès d'un PPGIS, de sa capacité à favoriser l'implication des citoyens et des communautés locales dans la réflexion et la décision.

- Le premier niveau consiste à analyser la disponibilité et l'accessibilité des technologies et des données. C'est en général ce qui est fait dans la plupart des études de cas déjà réalisées.
- Le deuxième niveau consiste à s'interroger sur les effets de la mise en œuvre réussie (d'un point de vue technologique et informationnel) d'un PPGIS, sur le fonctionnement démocratique au sein même de la communauté locale par exemple.

- Le troisième niveau enfin, consiste à évaluer les effets d'un PPGIS fonctionnant de façon démocratique au sein d'une communauté locale, sur la capacité de la communauté à refléter l'ensemble des tendances qui la composent de manière à lutter contre les risques d'accentuation des différenciations sociales. Sur ces deux derniers niveaux, le recul manque encore cruellement. C'est le point de départ que nous avons choisi de prendre pour développer un cadre conceptuel et méthodologique de suivi et d'évaluation des expériences PPGIS. Dans cette logique, le programme de recherche développé par l'équipe SOS-IG s'organise autour de trois phases.

### ■ PPGISciences : développer les bases théoriques et épistémologiques

Fondée sur une démarche de nature principalement épistémologique, la première phase constitue la base de ce programme. Elle consiste principalement en une analyse critique et une évaluation systématique de la recherche réalisée jusqu'à aujourd'hui dans le domaine des PPGIS, mais aussi dans le courant "critical GIS" qui les a vu naître.

Un observatoire Web des expériences PPGIS est également en cours de développement dans ce contexte pour compléter la réflexion par une assise empirique (un prototype est disponible ici : [http://sosig.scg.ulaval.ca/ppgis/accueil\\_ppgis.htm](http://sosig.scg.ulaval.ca/ppgis/accueil_ppgis.htm)). Durant cette étape, en plus du travail bibliographique, sur le plan méthodologique nous procédons à des enquêtes, étude Delphi, études de cas et analyse de type SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats).

### ■ PPGISystèmes : Elaborer un cadre conceptuel et méthodologique générique structurant

La deuxième phase découle de la première. La démarche s'articule ici autour de l'analyse des interactions entre les dimensions cognitives, les aspects sociaux de la participation, et les dimensions plus formelles des SIG participatifs.

■ ■ ■ A l'intersection de ces trois dimensions sont explorées les dernières approches développées dans les disciplines et travaux connexes aux PPGIS: en particulier la perception, les représentations et le raisonnement qualitatifs (Caron et Roche 2001, Edwards et Ligoza 2004), la gouvernance et les théories de la participation, concertation et décision (Guay 2005, Roche 2003, Joerin et alii. 2002), les ontologies et les métaphores spatiales à la base de la géomatique (Mostafavi et alii. 2004). Il s'agit de développer de nouvelles perspectives et orientations conceptuelles et méthodologiques pour formaliser un cadre de référence permettant de supporter l'évaluation et la mise en œuvre des solutions géomatiques participatives de type PPGIS.

## ■ PPGITechnologies: concevoir et développer des solutions géomatiques participatives

Cette troisième phase du programme s'appuie sur les deux premières et consiste à développer la composante prescriptive de la Chaire GSP. Partant du cadre développé lors de la deuxième phase, il s'agit à ce stade de concevoir, de développer et de tester des solutions technologiques participatives socialement adoptables et efficaces sur le plan participatif. Cette phase s'appuie sur des démarches de type ingénierie de système (conception, prototypage et tests). Elle s'appuie sur des partenariats développés tant auprès des industries auprès desquelles s'opère un transfert (et qui appuient le développement des solutions technologiques), qu'auprès des usagers potentiels (ministères, municipalités, bureaux d'études, ONG...). Deux champs thématiques privilégiés sont explorés comme contexte de test: le champ environnemental (développement durable, conservation, conflit d'usage et controverses environnementales), et le champ des infrastructures en particulier en milieu urbain (interdépendance des infrastructures et risques rattachés).

## Conclusion

La problématique de l'accès et des usages sociaux de l'information géographique et des technologies géomatiques par le grand public constitue aujourd'hui l'un des enjeux majeurs pour la commu-

nauté des sciences géomatiques. Les "Public Participation GIS" constituent une voie de réponse très prometteuse. Il reste que les bases théoriques et conceptuelles sont encore à développer pour que puissent être conçues et mises en œuvre des solutions technologiques innovantes, efficaces à soutenir la participation du public et adoptables sur le plan social. L'équipe SOS-IG au centre de recherche en géomatique de l'Université Laval à Québec concentre précisément ses actions pour apporter des réponses à cette problématique. Elle s'est engagée dans un programme de recherche, articulé autour de trois axes PPGISciences, PPGISystèmes et PPGITechnologies, dont l'objectif consiste à concevoir des solutions géomatiques participatives efficaces et accessibles pour le grand public. ●

## Références bibliographiques

- Caron C. et S. Roche, 2001, *Vers une typologie des perceptions spatiales*, L'espace géographique, n°1, pp. 1-12.
- Carver S., 2003, *The Future of Participatory Approaches Using Geographic Information: developing a research agenda for the 21st Century*, URISA Journal, vol.15, n°. special APA1, pp. 61-72.
- Craig W., T. Harris et D. Weiner (eds.), 2002, *Community Participation and Geographic Information Systems*, Taylor and Francis, London, 383 p.
- Cury M., 1998, *Digital Place: Living with Geographic Information Technologies*, Routledge, New York, 191 p.
- Edwards G. et G. Ligoza, 2004, *A formal model for structuring local perceptions of environmental space*, Cognitive processing, vol.5, pp. 3-9.
- Guay L., 2005, *Controverses socio-techniques, participations et décisions publiques*, in L. Guay, P. Hamel, D. Masson et J.-G. Vaillancourt, (dirs) "Mouvements sociaux et changements institutionnels: aspects comparatifs", Québec, Presses de l'Université du Québec (à paraître en 2005).
- Jankowski P. et T. Nyerges, 2001, *Geographic Information Systems for Group Decision Making*, Taylor and Francis, London, 273 p.
- Joerin F., Rey M.C., Desthieux G., Nembrini A., 2002, *Participation et information en aménagement du territoire urbain, Potentiels des instruments d'aide à la négociation et à la décision*. Revue Internationale de Géomatique, vol. 11, n°3-4, pp. 309-332.
- Laurini R., 2001, *Information systems for urban planning, a hypermedia co-operative approach*, Taylor and Francis, London, 349 p.
- Mostafavi, MA., Edwards G., Jeansoulin, R., 2004, *Ontology-based method for quality assessment of spatial data bases*. In:

Proceedings of ISSDQ'04, GeoInfo Series, Bruck/Leitha, Austria, pp. 49-66.

Pickles J. (ed), 1995, *Ground Truth: The Social Implications of Geographic Information Systems*, The Guilford Press, New York, 248 p.

Roche S., C. Péribois, B. Raveleau et J.

Soumagne, 2003, *ADONIS: ADOption des Nouvelles Informations Spatialisées*, rapport intermédiaire, programme de recherche ACI-Ville, Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris, France, janvier, 8 p. et CDRom.

Roche S., 2000, *Les enjeux sociaux des Systèmes d'Information Géographique: les cas de la France et du Québec*, L'Harmattan, Paris, 157 p.

Roche S., 2003, *Geographic Information and Public Participation: Research Proposal from a French Perspective*, URISA Journal, vol.15, n° special APA II, pp.29-36.

Roche S. et C. Caron (eds), 2004, *Aspects organisationnels des SIG*, Hermès-Lavoisier, Traité IGAT, série Géomatique, 313 p.

Schuurman N., 2000, *Trouble in the Heartland: GIS and Its Critics in the 1990s*, Progress in Human Geography, vol. 24, n°. 4, pp. 569-90.

Sheppard E., H. Couclelis, S. Graham, J. Harrington et H. Onsrud, 1999, *Geographies of the information society*, International Journal of GIS, vol.13, n°.8, pp. 797-823.

## Contact

Stéphane ROCHE

Centre de Recherche en Géomatique  
Université Laval, Pavillon Casault  
G1K 7P4 Québec, Canada  
Stephane.roche@scg.ulaval.ca

## ABSTRACT

*One of the main problems at stake regarding geomatics is to improve the access and use of geographical information by the public. Public participation GIS could be seen as the most popular and current solution to this issue. Nevertheless, there is a lack of conceptual and methodological foundations that are required to develop really useful PPGIS solutions. A team of the Centre for Research in geomatics at laval University (Québec, Canada) is currently working on a research project organized around three axes: the conception of PPGISciences epistemological foundations, the formalization of a development and evaluation framework for PPGISystems, and the development and test of innovative and useful PPGITechnologies.*



# Sciences géographiques dans la Haute Antiquité

*Morceaux choisis des huit premiers chapitres de l'ouvrage*

**"Sciences géographiques dans l'Antiquité – Connaissance du Monde – Conception de l'Univers"**  
de **Raymond D'Hollander** - Ingénieur général géographe honoraire

■ **Jean BOURGOIN** - Membre de l'Académie de Marine

*"Bien longtemps après l'apparition de l'homme, il y a sans doute un million d'années, la science en général parvient à se dégager de la réalisation des besoins matériels avec la civilisation du Nil et de l'Euphrate ; ceci explique que l'ouvrage consacré par R. D'Hollander aux sciences géographiques, couvre plusieurs millénaires, faisant débiter son propos à la Haute Antiquité. Il traite en premier lieu de cette période, à l'origine des rudiments qui permettront une mise en œuvre des domaines de la cartographie et de la topographie. Arpenteurs, architectes appuient leurs travaux sur des éléments qui relèvent notamment de l'arithmétique et de la géométrie, c'est à dire des mathématiques mais aussi de l'astronomie, science qui se développe dès les premières observations de son entourage par l'homme".*

**Préface : Suzanne Debarbat**, astronome titulaire de l'Observatoire de Paris, membre du bureau des Longitudes et de l'Académie Internationale d'Histoire des Sciences

**C**omprendre l'Univers et décrire le monde connu ou "œcumène" sont les deux grands objectifs de la science géographique de l'Antiquité. Ils reposent sur l'astronomie, d'une part, et une approche cartographique de la géographie, d'autre part.

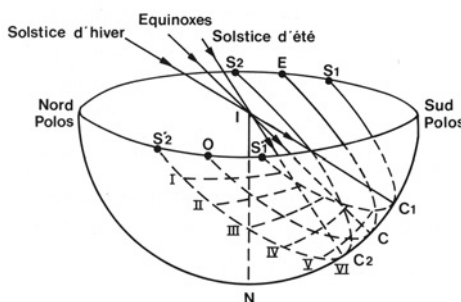
La civilisation égyptienne et la civilisation babylonienne prennent naissance au 4<sup>ème</sup> millénaire avant Jésus-Christ et couvrent une vaste zone s'étendant du Golfe persique à la Méditerranée, baptisée "croissant fertile".

Vers 3 300 avant J.C., l'homme découvre l'écriture idéographique, qui se transformera en écriture alphabétique dans la région Syro-palestinienne entre les XVIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles avant J.C. A la même époque apparaissent la numération décimale, l'arithmétique ainsi que la géométrie, puis l'astronomie et les sciences géographiques.

Les astronomes égyptiens déterminent l'équateur céleste. Ils utilisent dans la vie courante la décade, ou période de 10 jours, avant que les Assyro-Babyloniens créent la semaine de

7 jours. Leurs instruments astronomiques se composent du "merkhet" (tige verticale) pour observer le passage des étoiles dans le plan méridien, en l'alignant sur le fil à plomb, ainsi que la clepsydre ou horloge à eau, pour la mesure du temps.

A partir de - 750 (avant J.C.), les Babyloniens définissent l'écliptique, grâce au "scaphé" ou "polos", cuve hémisphérique au fond de laquelle est fixée une tige verticale, qui comporte à sa partie supérieure une petite boule, située au centre de la demi-sphère. L'ombre de la boule dessine sur la demi-sphère une courbe qui est la figure homothétique inverse de la trajectoire



apparente du soleil, lors du mouvement diurne. Cette trajectoire est une portion de parallèle de la sphère céleste. On doit également aux Babyloniens l'invention du cadran solaire vertical. Grâce au gnomon, au scaphé, ou au cadran solaire, les Babyloniens pouvaient déterminer les intervalles de temps et connaître "l'heure de la journée". Pour déterminer les intervalles de temps et connaître "l'heure", les Babyloniens avaient recours au scaphé ou au cadran solaire et à la clepsydre. Au scaphé, on divisait l'intervalle de temps séparant le lever du coucher du soleil en 12 parties, définissant ainsi les "heures inégales". Après avoir utilisé, comme les Egyptiens, la décade (période de 10 jours), les Babyloniens ont été les premiers à passer à la semaine, dont la durée correspond approximativement à celle des phases de la Lune.

Avec la détermination de l'écliptique, du zodiaque, l'établissement de tables donnant les positions des "astres mobiles", et notamment des éphémé-

- rides de la lune et les dates des éclipses, l'apport de la Haute Antiquité Assyro-Babylonienne à l'astronomie est importante, comme l'atteste l'usage qu'en fit Ptolémée. De leur côté, les Egyptiens ont été à la même époque à l'origine d'une géométrie pratique appliquée aux grands travaux, et d'une ébauche du cadastre.

Il reviendra aux Grecs d'établir les fondements d'une géométrie théorique, puis grâce à l'expédition d'Alexandre, qui leur permit d'entrer en contact avec les observateurs et calculateurs babyloniens, de développer l'astronomie. Alors s'élaborera la compréhension des mécanismes de l'Univers

## Sciences géographiques durant la période grecque

### ■ La première géographie des grecs. Ecoles grecques Des VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles avant J.C.

Vers 1 600 avant J.C., les Achéens venus du Nord envahissent le Péloponnèse et créent à Mycènes, Tyrinthe, Pylos, une civilisation brillante dont l'apogée se situe vers 1 200 avant J.C., lors de la guerre de Troie, à laquelle on a donné l'appellation de civilisation mycénienne, parce que les tombes d'Agamemnon (roi de Mycènes) et de Clytemnestre se trouvent à Mycènes. Au début du premier millénaire avant J.C., le bassin méditerranéen est sous l'influence de la Grèce, mais aussi sous celle de l'Etrurie, de l'Egypte et de la Phénicie, qui possède de nombreux comptoirs (Cadix, Gibraltar, Carthage, la Sicile, la Sardaigne). Dans ce cadre, la Grèce prend un rôle prédominant en créant les colonies de Gaule méridionale, dont Massilia (Marseille), la "Grande Grèce" (Italie du Sud et Sicile), la Cyrénaïque, l'Asie Mineure et la Mer Noire.

On convient généralement de situer la vie d'Homère au XIX<sup>e</sup> siècle avant J.C., alors que certains auteurs le disent contemporain du siège de Troie, vers 1250 avant J.C. On trouve dans l'époque homérique des informations intéressantes sur la géographie et la météorologie.

### ■ L'Ecole Ionienne

L'Ionie, en Asie Mineure, avec sa capitale intellectuelle Milet sera, à partir du 6<sup>ème</sup> siècle avant J.C., le foyer d'une brillante civilisation. Ce siècle fut marqué par la fin de la colonisation grecque, mais aussi par les vies de Bouddha, de Confucius et de Lao Tsé (père du taoïsme), de Thalès de Milet (625-547), qui introduisit en Grèce la géométrie abstraite et fut astronome et physicien. En qualité d'astronome, il est surtout célèbre par la prédiction d'une éclipse de soleil qui mit fin en - 585 à la guerre entre les Mèdes et les Lydiens. Hecathée de Milet est à l'apogée de sa carrière à la fin du VI<sup>e</sup> siècle et au début du V<sup>e</sup> siècle. Il est l'auteur du premier traité de géographie descriptive intitulée "voyage autour du monde", dans lequel il consigne ses étapes, ses observations sur les populations rencontrées, le climat, la végétation, les modes de vie et d'alimentation des populations rencontrées. Ses informations, rassemblées sous le nom de "périple", indiquent qu'elles relèvent souvent d'un cabotage le long des pays visités.

Les plus importants périple aux VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles sont les suivants :

- Le périple de Néchao II, roi d'Egypte, battu en - 605 par Nabuchodonosor, ayant armé une expédition à base de navigateurs phéniciens. Circuit : Mer Rouge, Afrique orientale, Le Cap, retour en Méditerranée par Gibraltar (colonnes d'Hercule)
- Le périple d'Euthymène (env - 530 avant J.C.) : de Massilia (Marseille) à l'oued Draa et retour.
- Le périple de Scylax (env - 510 avant J.C.), ordonné par Darius, pour établir une liaison Inde-Méditerranée.
- Le périple d'Hannon (entre 500 et 450 avant J.C.), amiral carthaginois, sur la côte Ouest d'Afrique, qui ne semble pas avoir dépassé l'archipel des Canaries.

### ■ L'Ecole Pythagoricienne

Pythagore naquit en 570 avant J.C., à Samos, et mourut en 480 avant J.C. Menacé par les Perses, il se réfugia en Italie du sud à Crotone pour s'établir ensuite à Métaponte (près de Tarente).

Il voyagea en Asie Mineure et en Egypte. Il aurait étudié chez les mages de Perse, chez les Chaldéens et les Brahmanes. Il fonda l'Ecole Pythagoricienne, qui eut une grande influence en Italie du sud, en Grèce et en Asie Mineure. Les Pythagoriciens forment une association à la fois scientifique, philosophique, politique et religieuse. Au point de vue scientifique, ils étudient les mathématiques (surtout l'arithmétique), l'astronomie, la musique, la médecine. Ils accordent une grande importance aux oppositions (limité-illimité, pair-impair, un-multiple, droit-courbe, etc.)

Pythagore bouleverse les conceptions antérieures du monde en donnant à la Terre une forme sphérique. Il est le premier à découvrir que "l'étoile du soir" est la même que celle du matin et qu'il s'agit en fait de Vénus. D'après Censorinus (III<sup>e</sup> siècle après J.C.), il place la Terre au centre du monde, puis l'eau, l'air, le feu, la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, et enfin la sphère des fixes supportant les étoiles. Il est le premier à affecter aux planètes des distances à partir de la Terre et à avoir donné le premier ordre correct des corps célestes ; à avoir conçu un système faisant intervenir les relations mathématiques, qui permettront à Kepler de percer le secret de l'Univers ; à avoir affirmé la forme sphérique de la Terre. Il est aussi l'initiateur de la Science expérimentale, notamment en acoustique.

### ■ Conclusions sur la science grecque des VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles avant J.C.

Concernant la structure de la matière, "La Science antique et médiévale" tome I de "l'histoire générale des Sciences" donne la synthèse des conceptions élaborées par les philosophes grecs. Elle se caractérise par :

- La multiplicité des substances dès l'origine (cf Anaximandre, Anaxagore)
- La pluralité limitée à certaines substances élémentaires, dont les combinaisons engendrent des composés accessibles à nos sens : les quatre racines sont pour Empédocle la terre, l'eau, l'air et le feu.

- Une seule substance primordiale, l'eau ou l'air, ou le feu susceptible de se transformer dans toutes les autres, pour Thalès, Anaximène, Héraclite.
- Une seule substance, sans qualité, mais divisée en particules distinctes, éléments derniers (atomes) dont l'agencement permet la formation de différents corps, pour Leucippe et Démocrite.
- Tout dérive du nombre entier, ce qui implique la discontinuité de la matière et annonce l'atomisme et la formation de molécules répondant à diverses combinaisons numériques (cf. Les Pythagoriciens)

De toutes ces théories, c'est celle Empédocle, relative aux quatre éléments, qui exercera la plus grande influence sur l'évolution des sciences géographiques, avec Aristote, puis avec les auteurs du Moyen-Âge, jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle.

Concernant les conceptions cosmogoniques, en exceptant celles d'Anaximandre, très élémentaires, et celles de ses successeurs (Ecole Ionienne, Ecole d'Elée), bien naïves, le seul système digne d'être retenu est celui de l'Ecole Pythagoricienne, qui affirme la sphéricité de la Terre et le mouvement des corps célestes, selon des cercles concentriques à la Terre. Le modèle de Philolaos marque une étape importante en reconnaissant le mouvement de la Terre dans l'espace, autour du "feu central". On ne peut qu'admirer le génie spéculatif de philosophes grecs des VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles avant J.C., en ce qui concerne la structure de la matière et l'agencement de l'Univers.

Concernant l'astronomie, les astronomes des VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles avant J.C. s'attachent surtout par leurs observations à résoudre des problèmes de calendrier conformément à la finalité assignée à l'astronomie par Socrate, dans le "Gorgias".

L'acquis de ces premières écoles est relativement modeste, comparé à celui des Babyloniens.

***Les héritiers de l'Égypte des Pharaons sont sans conteste les Grecs qui ont puisé, dans leurs développements pratiques, les éléments de l'épanouissement de leur science.***

***R. D'HOLLANDER décompose le sujet de manière chronologique, dans onze chapitres consacrés à la période grecque. Il présente tour à tour, les liens entre géographie et astronomie, la première ne pouvant se développer sans la seconde ; la science se constitue alors en une discipline autonome, libérée des aspects purement techniques, tout en s'y appuyant pour ses applications.***

***La sphéricité de la Terre est affirmée vers la fin du V<sup>e</sup> siècle avant notre ère et l'on s'emploie bientôt à établir des cartes pour la navigation en Méditerranée, mer qui occupe le centre des terres habitées. Parmi les navigateurs les plus célèbres figure Pythéas dont le souvenir demeure très vivant à Marseille. Eudoxe s'efforce de préciser les dimensions du globe terrestre, tandis qu'Aristote et Dicéarque de Messine s'emploient à l'étude des aspects géographiques du sujet, décrivant alors l'œcumène. Il faut attendre Eratosthène et la grande époque d'Alexandrie pour parvenir à des progrès décisifs. Cette évolution se fonde sur l'héritage de Platon et d'Aristote mais aussi sur des éléments plus orientaux. La géodésie grecque, fondement d'une cartographie précise, se base sur les propriétés du cercle, tandis qu'Apollonius de Perge traite des coniques ; ces derniers joueront un rôle important pour les représentations cartographiques de la sphère terrestre sur un plan. La géographie mathématique atteindra son apogée en quatre siècles, de l'époque d'Eratosthène à celle de Ptolémée en passant par Hipparque. Le premier, Eratosthène, réalise la "mesure de la Terre" entre Syène (de nos jours Assouan) et Alexandrie par une méthode originale. Pour l'œcumène, il en améliore la représentation, tandis qu'Hipparque, par observations astronomiques, jette les bases de la cartographie mathématique. Le troisième, Ptolémée, est celui dont la "Géographie" marquera, pour longtemps ce domaine ; peut-être s'appuyait-il sur les travaux de Marin de Tyr !***

Suzanne Debarbat

## **Géographie et astronomie grecques durant la deuxième moitié du V<sup>e</sup> siècle et le IV<sup>e</sup> siècle avant J.C.**

**D**urant la deuxième moitié du V<sup>e</sup> siècle et le IV<sup>e</sup> siècle avant J.C., on assiste à un véritable épanouissement de la géographie et de l'astronomie grecques.

Hérodote opère la transition entre la géographie ionienne primitive et une géographie plus élaborée.

Après lui, le célèbre philosophe Platon portera un grand intérêt aux sciences géographiques et aura une influence considérable sur l'astronomie grecque. Autolycus apportera, par considérations uniquement géométriques les élé-

ments nécessaires à la prédiction des levers et des couchers héliques des étoiles, qui jouaient un grand rôle dans la vie pratique des grecs.

Eudoxe fut le premier à proposer un modèle cinématique rationnel de l'Univers, expliquant notamment les stations et les rétrogradations des planètes. Son modèle fut perfectionné par Callipe et Aristote, qui conservera durant des siècles un prestige immense. Son œuvre aura sur la pensée médiévale, tant arabe qu'occidentale, une influence prépondérante. Le



■ ■ ■ grand géomètre de l'Antiquité Euclide s'est aussi intéressé à l'astronomie. Alexandre le Grand, disciple d'Aristote, par son expédition en Asie, étendit considérablement l'oecumène grec en longitude, alors qu'à peu près au même moment Pythéas, astronome et géographe massaliote (marseillais), l'étendait en latitude, par son voyage maritime au Nord de l'Europe. Nous allons développer quelque peu les biographies des personnages ci-dessus, qui ont marqué la deuxième moitié du V<sup>e</sup> siècle et le IV<sup>e</sup> siècle avant J.C.

## Hérodote (484-425)

### ■ Hérodote historien et géographe

Hérodote naquit à Halicarnasse, ville doriennne de la Carie en 484 avant J.C, alors que Xerxès envahissait la Grèce. Il se réfugia à Samos (sa seconde patrie). Après un long voyage, Hérodote se fixa vers 446 à Athènes, où il devint ami de Périclès et Sophocle. Hérodote fut à la fois historien et géographe. Il eut le mérite de concevoir une histoire universelle de la lutte de la Grèce contre Xerxès, dans un contexte historique, en décrivant les événements, les peuples et les lieux. En tant que géographe il conserve une Terre plate.

### ■ Les voyages d'Hérodote

Hérodote fut un voyageur curieux, attentif, observant les mœurs des peuples et recueillant des informations de toute sorte. Il visita l'Egypte, d'où il rapporta la conviction que le Nil ne s'alimente pas dans "l'Océan circulaire" : le Nil ayant une embouchure face à celle du Danube, c'est à dire à peu près à la même longitude, les sources des deux fleuves devaient être aussi face à face. Aussi fit-il décrire au Nil une large boucle à peu près symétrique de celle du Danube, à partir d'une source située dans l'Atlas. Ainsi le Nil "vient de l'Ouest" et il "coupe la Libye par le milieu". On voit apparaître pour la première fois sur le Nil le nom de Syène (l'actuelle Assouan) qu'Hérodote ne dépassa pas ; mais d'après les renseignements qu'il recueille, il ajoute Méroë, cité royale des Ethiopiens. On désignait par Ethiopie la Haute Egypte et

toute la zone soudanaise, les Ethiopiens orientaux étant les peuples qui vivaient entre la Perse et l'Indus. Il visita aussi Cyrène et une partie de la Libye. Il visita aussi la Mésopotamie, où il observa la mise en valeur du pays : canaux d'irrigation, culture intensive des céréales, plantations de palmiers dattiers. Il mentionne Babylone sur l'Euphrate, Suse sur un affluent du Tigre. Il visita également les colonies grecques du Pont Euxin. Hérodote n'a évidemment pas visité toute l'étendue de sa mappemonde. Durant longtemps encore, les Grecs connaîtront très mal la Celtique, et ils confondront les Pyrénées avec les Alpes sous le toponyme commun de Pyrène. Comme Hécatee, Hérodote emprunte au "périple de Syllax" tout ce qui concerne l'Inde, qu'il limite aux provinces riveraines de l'Indus et du Nord-Ouest du pays ; il ne dispose pas d'informations sur le Gange ; au-delà de l'Inde l'Asie n'est plus "qu'un désert sur lequel on ne sait rien"

## Platon (424 – 347)

Le berceau de la science grecque était depuis le VI<sup>e</sup> siècle avant J.C à Milet et en Ionie (Asie Mineure). Après un déplacement en Grande Grèce, avec l'Ecole Pythagoricienne, le foyer de l'hellénisme va se fixer pendant un certain temps en Grèce continentale, à Athènes et autour d'Athènes avec Platon et Aristote. A la naissance de Platon, en 424 avant J.C., l'Attique était parvenue à un haut degré de civilisation (citons seulement Phidias, Praxitèle, Euripide, Sophocle, Aristophane, Socrate, Alcibiade).

A la mort de Socrate, Platon quitte Athènes, visite l'Italie, l'Afrique et la Perse. Après dix ans d'absence, il revient en Italie et passe en Sicile où il est vendu comme esclave. En 388, il est à Athènes, où il fonde "l'Académie".

### ■ Le système du monde de Platon

Comme les Pythagoriciens, Platon affirme la sphéricité de la Terre et de tous les corps célestes. La Terre est immobile et occupe une position centrale, autour de laquelle les astres accomplissent leurs révolutions à distances variées, selon des mouvements

circulaires uniformes. La Terre est immobile au centre du Monde, en contradiction avec les Pythagoriciens, mais Platon reviendra sur cette affirmation à la fin de sa vie.

Le dogme platonicien de la sphère et du cercle, figures parfaites qui doivent être parcourues par les corps célestes selon des mouvements uniformes, allait jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle obliger les astronomes à mettre au point des systèmes sophistiqués pour expliquer le mouvement des planètes, leur stations et leurs rétrogradations. Le premier des ces systèmes est celui des sphères homocentriques d'Eudoxe. Il faudra attendre Kepler, c'est à dire plus de 19 siècles pour mettre fin au dogme du mouvement circulaire des planètes.

## Autolycus de Pitane (300 avant J.C.)

Autolycus est originaire de Pitane en Eolide. Il florissait vers 330 avant J.C. Faute d'une approche trigonométrique pour laquelle il faudra attendre Hipparque, l'astronomie mathématique ne pourra s'appuyer que sur des approches purement géométriques, comme ce fut le cas avec Autolycus, en ce qui concerne le mouvement diurne et la sphéricité de la terre, dans ses deux ouvrages "la sphère en mouvement" et "les levers et couchers des étoiles". "La sphère en mouvement" est le plus ancien traité d'astronomie qui nous soit parvenu des grecs. Les deux ouvrages d'Autolycus sont aussi les deux premiers ouvrages d'une collection grecque que l'on appelle "la Petite Astronomie" par opposition à la "Grande Syntaxe Mathématique" de Ptolémée, plus connue sous le nom "d'Almageste" que lui ont donné les Arabes. Dans "Les levers et couchers des étoiles", Autolycus aborde le problème de l'établissement des repères chronologiques durant l'année grâce aux levers et au coucher des étoiles. En effet, les travaux agricoles étaient réglés sur le lever et le coucher héliaques de certaines étoiles, d'où l'importance de prévoir ceux-ci. Ce problème est naturellement lié à celui de l'établissement du "paraegme", c'est à dire de l'almanach d'étoiles.

## L'astronomie grecque D'Eudoxe de Cnide à Euclide IV<sup>e</sup> siècle avant J.C.

L'astronomie géométrique amorcée par Autolycus va connaître son apogée avec Eudoxe de Cnide, l'un des plus grands astronomes grecs, né vers 408 avant J.C., à Cnide, île de la mer Egée. Eudoxe se rendit à Athènes pour suivre les leçons de Platon qu'il quitta par la suite. Il fit de nombreux voyages, au cours desquels il effectuera des observations de levers et couchers d'étoiles, qui l'aideront à dresser sa sphère céleste (sphère d'Eudoxe). Les ouvrages composés par Eudoxe ont malheureusement été perdus.

D'après Pline, Eudoxe aurait rapporté d'Égypte l'année de 365 jours 1/4, soit le cycle de 4 années de 365 jours et une année de 366 jours. Ce cycle commençait à un solstice d'été qu'il avait observé et que l'on a pu situer au 13 juillet 381 avant J.C.

D'après Archimède, il donnait au soleil un diamètre réel de 9 fois plus grand que celui de la lune.

Selon Vitruve (1<sup>er</sup> siècle avant J.C.), on attribue à Eudoxe le cadran solaire horizontal, pourvu de courbes pour lire l'heure et la date. Excellent géomètre, Eudoxe a vraisemblablement eu l'idée de la projection stéréographique dont dérive l'astrolabe. Astronome, il avait un profond mépris pour l'astrologie.

### L'œuvre d'Eudoxe

L'œuvre d'Eudoxe est immense et nous n'en présentons que quelques aspects : La sphère d'Eudoxe est un globe céleste sur lequel étaient tracés l'équateur, les deux tropiques, les "cercles arctiques", les cercles horaires (dont les colures d'équinoxes et de solstices), l'écliptique (baptisé "cercle médian"), les étoiles. Elle servit de modèle pour les globes célestes à l'usage des marins (sphère d'Aratus), en particulier pour la détermination approximative de l'heure de nuit par un parapegme, sorte d'almanach donnant les dates des levers héliaques des principales étoiles.

L'œuvre géographique d'Eudoxe est une "description de la Terre" en 7 livres, malheureusement perdue. Eudoxe a

été le premier à lier la géographie à l'astronomie. Il a relevé astronomiquement des latitudes en Égypte, à Cyzique et à Cnide. Il a également déterminé la longueur de la circonférence terrestre à partir d'une mesure entre Cnide (Rhodes) et Héliopolis, décomposée en deux segments : Rhodes-Alexandrie et Alexandrie-Héliopolis. Il détermina aussi la position du pôle céleste, distant à l'époque de plus de 8° des étoiles les plus proches. Sa détermination sera ultérieurement améliorée par Pythéas. Tout en respectant la conception géocentrique de l'Univers, le modèle des sphères géocentriques d'Eudoxe constitue la première tentative d'explication rationnelle des mécanismes de l'Univers et en particulier des "stations" et des "rétrogradations" des planètes. Le système d'Eudoxe comportait 27 sphères homocentriques, qui représentaient assez bien les mouvements du soleil et de la lune.

### Euclide d'Alexandrie (env 295 avant J.C.)

Euclide vécut à Alexandrie à la fin du IV<sup>e</sup> siècle et au début du III<sup>e</sup> siècle avant J.C. C'est le plus célèbre géomètre de l'Antiquité. Ses "éléments de géométrie" restent la base de ce qu'on appelle la "géométrie euclidienne". On y trouve des théorèmes importants sur la nature des triangles et sur la proposition connue sous le nom de théorème de Pythagore, qui est le fondement de la doctrine des cordes (et des sinus), base de la trigonométrie. Dans un autre ouvrage d'astronomie, intitulé "les Phénomènes", qui contient toutes les connaissances que l'on avait en Grèce au début du III<sup>e</sup> siècle avant J.C., il énonce notamment 18 théorèmes. Euclide y définit le concept de "parallèle céleste", cercle décrit par une étoile dans le mouvement diurne et ayant dans l'hémisphère nord le pôle céleste boréal pour pôle géométrique. Il définit aussi la notion "d'étoile circumpolaire", qui n'a ni lever ni coucher. Il met clairement en évidence que le lever et le coucher d'une étoile impliquent l'existence d'un "cercle horizon", appellation dont il semble être l'auteur.

Euclide démontre en géomètre que le monde est sphérique et tourne autour

de l'axe des pôles célestes. Il appelle "méridien" un cercle passant par l'axe des pôles, contenant la verticale du lieu, perpendiculaire à l'horizon. Il désigne le "zénith" par le pôle de l'horizon et l'écliptique par le cercle oblique du zodiaque. Euclide n'a rien découvert de fondamental en astronomie, mais il a eu le mérite d'énoncer dans un langage clair des notions connues avant lui, mais souvent confuses. Il est aussi l'auteur d'un traité d'optique dont certaines propositions concernent l'astronomie.

### Aristote. Alexandre le grand et l'extension de l'oecumène

#### ■ Aristote (384-322)

Aristote naquit en 384 ou 383 avant J.C. à Stagire (Thrace). Dans sa jeunesse, il vint à Athènes, où il fut élève de Platon. En 343 ou 342 avant J.C., le roi Philippe de Macédoine le fit venir à sa cour de Pella pour faire l'éducation de son fils Alexandre. Six ans plus tard, après la mort de Philippe et l'avènement d'Alexandre, Aristote rejoignit Athènes et y fonda son école dans un gymnase consacré à "Apollon Lycéen", d'où le nom de Lycée donné à cette école qui supplantera l'Académie de Platon. L'enseignement s'y donnait "ex cathedra", mais se poursuivait en promenade du maître et de ses disciples, d'où l'expression d' "école péripatéticienne".

#### ■ L'œuvre d'Aristote comprend trois groupes d'ouvrages :

Les traités logiques, l'histoire naturelle, les physiques. Contrairement à Platon, Aristote accorde une grande importance à l'observation. Pour lui, l'Univers est limité et clos. Reprenant le mythe platonicien, le monde sublunaire pour Aristote est soumis aux changements, synonymes de dégénérescence et corruption. Mais au-dessus de la sphère de la lune, les cieux se maintiennent intangibles.

#### ■ La géographie d'Aristote

##### Extension de l'oecumène

Aristote est le premier philosophe grec à donner des arguments pour prouver la sphéricité de la Terre (dans les éclipses de lune, l'ombre de la terre sur la lune a une

■■■ forme circulaire). La zone habitable (œcumène) est resserrée dans sa largeur, d'un côté par la zone polaire, de l'autre par la zone tropicale. Pour Aristote le monde se partage en trois grandes parties : l'Europe, l'Asie, et la Libye (Afrique)

## Géographie physique

Aristote est le fondateur de la géographie physique. Il explique dans les "Météorologiques", que le moteur des transformations est le mouvement double du soleil : le mouvement quotidien avec l'alternance jour-nuit et le mouvement annuel avec les variations de déclinaison. Les tremblements de terre sont provoqués par les mouvements de l'air souterrain. Les marées sont dues aux vents.

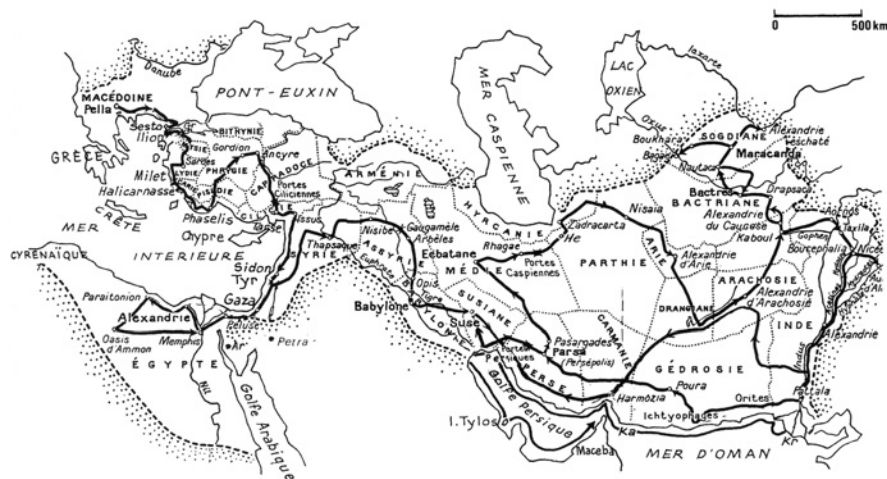
## Les connaissances géographiques d'Aristote

Aristote connaît trois grandes îles : la Grande Bretagne, l'Irlande, l'île Taprobane (Ceylan ou Sri Lanka), dans la "mer Erythrée" (océan indien). Il n'améliore pas les notions confuses des Grecs sur la partie occidentale de l'œcumène et sur la Celtique, où les Alpes ne sont pas distinguées des Pyrénées. Aristote fut un excellent naturaliste pour son époque, en décrivant 400 espèces animales. On lui doit la grande division du règne animal entre vertébrés (sanguins) et invertébrés (exsangues), ainsi que la notion capitale d'espèce animale.

## L'itinéraire d'Alexandre le Grand (-334-323)

Avant d'aborder "l'itinéraire d'Alexandre le Grand", il n'est pas inutile de rappeler une autre expédition militaire, en 401 avant J.C., appelée "Anabase de Xénophon", qui fit parcourir à son auteur l'Assyrie, l'Arménie, les bords de la Mer Noire, les Monts du Kurdistan et le sud du Caucase, ce qui était une "première" pour un grec.

Alexandre le Grand, élève d'Aristote, fut un prodigieux homme de guerre, doublé d'un homme éclairé, à l'esprit ouvert, qui se faisait accompagner par des philosophes et des ingénieurs, dont les fameux "bématises", chargés de l'arpentage des pays conquis. En 336 avant J.C., Alexandre mène campagne contre les Thraces.



■■■ limite de l'Empire d'Alexandre

Carte 5.4 Limite de l'Empire d'Alexandre  
Ar : Arsinoë  
He : Hecatompyles  
Ka : Karpella (près du Cap Jask)  
Kr : Krokala

## ■ Itinéraire d'Alexandre de Pella (Macédoine) à l'Indus

En 334, à la tête de son Armée, Alexandre pénètre en Asie et remporte contre les Perses la bataille du Granique (Gr sur la carte 5.4 jointe). Il conquiert l'Asie Mineure, la Syrie, l'Égypte, (poussant jusqu'à l'oasis d'Ammon). Au retour, il passe à Thapsaque, Nisibe, remporte une victoire à Gaugamèle, entre en 331 à Babylone et atteint Suse. Il arrive à Persépolis et à Pasargades, qu'il atteint en 330. Traversant la Perside, berceau des Perses, il rejoint la Médie et Ectabane, d'où Darius s'était enfui. Puis il franchit les "Portes Caspiennes", contourne le massif de l'Elbrouz, arrive dans une plaine florissante, jouxtant la Mer Caspienne, où il regroupe son armée. Il poursuit vers l'Est, puis oblique vers le sud, fonde Alexandrie d'Aris (Hérat).

Il continue vers le sud et atteint fin 330 le fleuve Helمند, qui se jette dans une dépression fermée en Drangiane. Il remonte ce fleuve, fonde Alexandrie d'Arachosie, pénètre en Afghanistan et atteint Kaboul. Au printemps 329, il franchit l'Hindou-Kouch et conquiert Bactres. Ayant franchi l'Oxus (actuellement l'Amou Daria), il pousse une reconnaissance en Sagdiane où il conquiert Maracanda (actuellement Samarcande) ; sur la rive gauche de l'Iaxarte (actuellement Syr Daria) il fonde Alexandrie Eschaté.

Dans le trajet de Suse à Samarcande, Alexandre et les bématises qui l'accompagnaient avaient noté l'orientation des chaînes de montagnes, des fleuves et rivières, ils avaient constaté des reliefs prodigieux, avec des gorges profondes et étroites, tels qu'il n'en avaient jamais vus.

Au printemps 327, Alexandre quitte Bactres, franchit à nouveau l'Indou Kouch, repasse à Kaboul, traverse l'Indus et parvient à Taxila, haut lieu du Brahmanisme, d'où il part pour la conquête du Pendjab. Il traverse une série de rivières, mais arrivé à Hyphase il s'arrête, car son armée, épuisée refuse de le suivre plus en avant. Il fait marche arrière, rejoint l'Hydapse, affluent de l'Indus et fait construire une flotte avec des bois des pentes de l'Himalaya.

## ■ La descente de l'Indus

La flotte d'Alexandre comportait environ 2000 navires, dont 800 vaisseaux de guerre et de transport. L'armée d'Alexandre est évaluée à 120 000 hommes. La plus grande partie de cette armée embarque à Nicée le 23 octobre 327 avant J.C. Au cours de la descente de l'Indus, Alexandre dirigea plusieurs opérations militaires et fonda Alexandrie des Sogdes. Avant d'arriver à Pattala, il ordonna à Cratès de rejoindre la Carmanie par le milieu des terres afin de procéder à la reconnaissance et à l'arpentage de cette partie intérieure de son



empire, alors que lui-même avait décidé de prendre l'itinéraire le plus pénible, passant par le désert de Gédrosie. A Pattala, il arriva environ 10 mois après son départ de Nicée.

### ■ L'itinéraire de retour de Pattala à Babylone

De Pattala, Alexandre traversa le désert de Gédrosie sous une chaleur accablante et fit une première jonction avec sa flotte près du détroit d'Ormuz. A Persépolis, il ferma l'immense boucle de son itinéraire, opéra ensuite une nouvelle jonction avec sa flotte au fond du Golf Persique, puis rejoignit Suse, où il procéda à la distribution de gratifications pour son armée. Il avait déjà épousé Roxane, fille du Satrape de Bactriane ; à Suse, en 324, il épousa Barsine, fille de Darius. Ses principaux officiers épousèrent aussi les filles des plus nobles familles persanes.

De Suse, il partit reconnaître une partie de la péninsule arabique et il pressentit qu'elle était aussi vasque que l'Inde. Il mourut à Babylone en 323 avant J.C., à l'âge de 33 ans, après avoir contracté 8 blessures en 11 années d'expéditions.

### ■ L'expédition de Néarque

Alexandre avait confié à Néarque le commandement de sa flotte, avant de l'avoir quitté à Pattala au début de l'automne 326.

Néarque avait reçu l'ordre de reconnaître les côtes de la Mer d'Oman et du Golfe Persique jusqu'aux bouches du Tigre et de l'Euphrate. Néarque descendit la branche occidentale de l'Indus, de Pattala à Krokala, qui fut le premier port maritime des Indes dans lequel des vaisseaux grecs, construits en Inde, aient pu jeter l'ancre. Les Barbares ayant commencé des attaques, la flotte mit à la voile en automne (on a pu reconstituer la date d'appareillage de la flotte d'après un lever de constellation, soit environ 23 jours après l'équinoxe d'automne de l'année 326 avant J.C.) La première partie de la navigation de Néarque s'effectua de Krotala au cap Jask, situé tout près de la Karpella de Ptolémée. Il reconnut la côte des Orites, celle des Ichtyophages (qui se nourrissaient uniquement de poisson séché). Tous les caps, baies et accidents du trait de côte furent notés. La deuxième par-

tie de la navigation de Néarque eut lieu du cap Jask à l'embouchure du Pasitigris. Il pénètre ensuite dans le Golfe Persique, atteint Minab où il retrouva Alexandre et une partie de son armée. Il arriva à Suse fin février 325 avant J.C. après environ 4 mois de navigation depuis Krotala et après avoir rempli parfaitement ce que lui avait confié Alexandre. Dans l'ensemble le bilan géographique de l'expédition de Néarque est important. Il porte notamment sur la description des côtes, l'étude des habitants, de la faune, de la végétation, des climats, des paysages, des productions : riz, coton, belles mousselines, canne à sucre, soie.

Néarque a ouvert une voie commerciale nouvelle, qu'avait imaginée Alexandre pour importer des marchandises en Grèce.

### ■ Bilan de l'expédition d'Alexandre le Grand

Alexandre avait en 11 ans quasi doublé la surface de l'oecumène grec. Les itinéraires à grand parcours levés par les bématises d'Alexandre reçurent un tracé bien défini, devinrent de grandes voies commerciales et militaires dans les royaumes nés de l'Empire d'Alexandre, fixant les grands itinéraires caravaniers de la Chine et de l'Inde vers la Méditerranée. La longue voie longitudinale qui partait du Tyr, puis gagnait le Pamir et la Chine, fut pendant des siècles "la route de la soie". En 1931, la "croisière Jaune" d'André Citroën emprunta dans sa traversée de l'Iran et de l'Afghanistan, le parcours suivi par Alexandre le Grand vingt siècles auparavant.

Alexandre fonda 7 villes portant le nom d'Alexandrie. Alexandrie d'Égypte, dont le choix du site fut particulièrement heureux, contribuera largement au rayonnement de la culture grecque à partir du III<sup>e</sup> siècle avant J.C. Il fit aussi construire des ports, des digues, des canaux, des ponts et recenser les productions des pays conquis.

### Pythéas et l'extension de l'oecumène

Né à Massalia (Marseille) Pythéas (320 -300 ou 380-360 avant J.C.) est présenté par la plupart des auteurs anciens

comme un homme pauvre, grand explorateur et bon astronome. Il lui revient d'avoir étendu l'oecumène en latitude. Malheureusement son œuvre a été perdue et beaucoup de problèmes se posent à son sujet.

### ■ La détermination de la latitude de Massalia par Pythéas

On doit à Pythéas une détermination de la latitude de Massalia effectuée lors de la culmination du soleil au solstice d'été en utilisant le gnomon. Elle donne la valeur arrondie de 43°13' pour la latitude, à comparer à celle de la cartographie actuelle de l'IGN de 43°18', soit un écart de 5'. Il s'agit donc d'un résultat fort honorable.

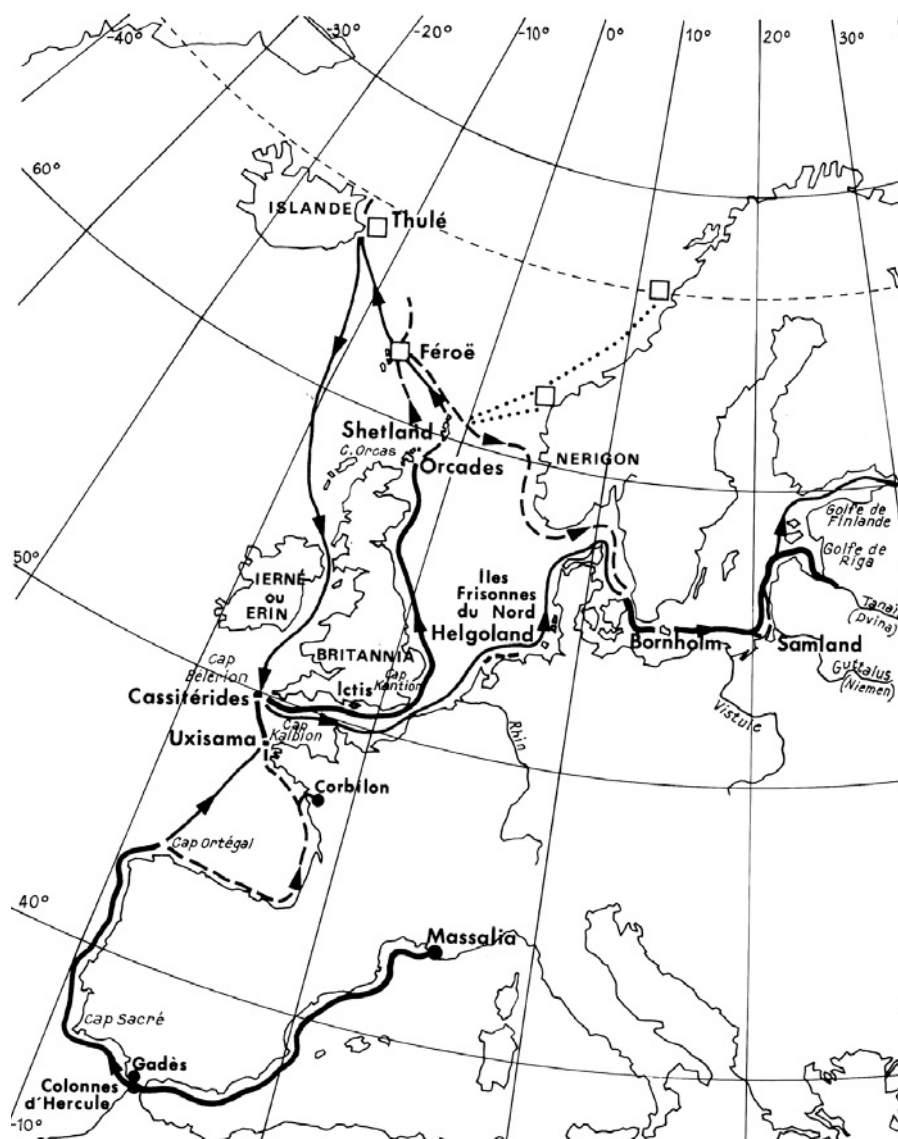
### ■ Le voyage d'exploration de Pythéas

Pour son voyage dans le nord, Pythéas avait besoin de savoir déterminer la position du pôle céleste boréal à partir des étoiles. Pour cela, en observant la direction "β" Petite Ourse – "k" du Dragon, il devait connaître la correction à apporter à la hauteur d'une de ces étoiles pour obtenir la hauteur du pôle, donc la latitude.

Pythéas avait peut être suivi l'enseignement d'Eudoxe de Cnide. Il avait une bonne réputation d'astronome et ses compatriotes le choisirent pour un voyage d'exploration dans les mers du Nord destiné à reconnaître les régions où l'on exploitait l'ambre et l'étain (métal précieux pour la fabrication du bronze). Or le commerce de l'étain et de l'ambre était le monopole des carthaginois, qui verrouillaient habituellement les colonnes d'Hercule (Gibraltar).

On admet généralement que Pythéas a fait tout son itinéraire sur un navire marseillais. Faute de sources sûres, on attribue au voyage de Pythéas une durée comprise entre 4 mois et 6 ans. Les deux ouvrages de Pythéas "Sur l'océan" et "Description de la Terre" ont été perdus. L'expédition de Pythéas n'est donc connue que par ses admirateurs, tels Dicéarque, Timée de Tauroménium, Eratosthène, Hipparque et ses détracteurs, tels Polybe et Strabon.

La carte jointe donne l'itinéraire de Pythéas, avec ses variantes en tireté. A partir des données de localisation et de



les observations faites par Pythéas au cours de son expédition, et notamment sur les instruments utilisés pour viser le soleil et les étoiles les plus proches du pôle et la détermination des climats de 16h, 17h, 18h, 19h.

Ce navigateur massaliote a cependant été l'un des plus grands explorateurs grecs; le premier, il a décrit la (Grande) Bretagne; il en a fixé la forme en exagérant toutefois ses dimensions.

## L'astronomie grecque à la fin du IV<sup>e</sup> siècle et du III<sup>e</sup> siècle avant J.C.

L'histoire de l'astronomie grecque à la fin du IV<sup>e</sup> siècle et du III<sup>e</sup> siècle avant J.C. est marquée par deux faits saillants :

- La réfutation du dogme de la fixité de la Terre qu'Héraclide du Pont (375-310) fait tourner sur elle-même et qu'Aristarque de Samos (310-230) fait à la fois tourner sur elle-même et autour du soleil, concevant ainsi l'héliocentrisme 18 siècles avant Copernic.
- Des essais de détermination des dimensions du système solaire par Aristarque de Samos et par Archimède.

On ignore l'auteur de la détermination de la longueur de la circonférence terrestre utilisée par Archimède, basée sur les considérations suivantes. A Lysimachie (Thrace) la tête du Dragon passe au zénith, alors que c'est le Cancer qui passe au zénith de Syène (Assouan). L'arc compris entre le Dragon et le Cancer représente un quinzième du méridien terrestre, soit  $360/15 = 24^\circ$ . Comme la distance de Syène à Lysimachie est de 20 000 stades, la longueur de la circonférence terrestre est :  $L = 15 \times 20\,000 = 300\,000$  stades, chiffre que Cléomède compare à la longueur obtenue par Eratosthène de 250 000 stades. La différence de latitude entre Syène et Lysimachie étant d'après cette détermination de  $24^\circ$  et Syène étant sur le tropique à environ  $24^\circ$  de latitude, la latitude de Lysimachie aurait dû être de  $48^\circ$ , alors que cette latitude ne dépasse pas  $40^\circ,5$ . Par ailleurs la distance en stades d'Eratosthène entre Lysimachie et Syène n'est que de 12 000 stades au lieu de 20 000. Ainsi la différence de lati-

### Itinéraire de Pythéas

description, trois hypothèses principales ont été émises concernant la position géographique de Thulé :

- Thulé serait une île de l'archipel des Féroë; cette hypothèse est plausible
- Thulé serait l'Islande : Pythéas a indiqué que Thulé était habitée et l'Islande ne l'a pas été avant le VIII<sup>e</sup> siècle. En outre, il n'est pas possible de faire une traversée à partir de la Grande Bretagne en 6 ou 7 jours de navigation. Par contre, l'Islande se trouve située entre le parallèle  $63^\circ 20'$  et le cercle polaire de latitude actuelle  $66^\circ 33'$ , de sorte que la latitude de  $65^\circ$  atteinte pourrait être celle d'un des caps orientaux de l'île.
- Thulé serait sur la côte norvégienne : les partisans de la Norvège estiment que Pythéas ne pouvait atteindre l'Islande en 6 à 7 jours à partir du nord

de la Grande Bretagne. Déporté par de forts vents d'ouest, Pythéas aurait atteint la côte norvégienne à une latitude à peu près égale à celle des îles Féroë, ou éventuellement plus au nord.

Le périple de Pythéas a été estimé à 185,5 jours de navigation.

### Conclusion sur Pythéas

Pythéas affirmait avoir vu des Celtes à 6300 stades de Marseille, ce qui donne environ  $52^\circ$  de latitude, qui est la latitude des Bouches du Rhin. Il avait raison contre Strabon qui fixait la limite nord de la Celtique, d'ouest en est de l'île d'Ouessant aux Bouches du Rhin, à la latitude à peu près uniforme de  $3800$  stades à partir de Marseille, soit environ  $49^\circ$  de latitude. Pythéas avait vu juste. On n'a que peu de renseignements sur

tude entre les deux villes représentait une erreur par excès de  $7,5^\circ$ , la distance étant elle-même par excès de 8 000 stades. On se perd en conjectures sur la médiocrité de cette détermination, pourtant utilisée par Archimède.

## La géographie mathématique de la fin du IV<sup>e</sup> siècle et du III<sup>e</sup> siècle avant J.C.

Le périple de Pythéas, l'expédition d'Alexandre, les progrès de l'astronomie vont permettre d'affiner l'image du monde, grâce notamment à deux géographes mathématiciens : Dicéarque et Eratosthène, ce dernier obtenant une précision assez remarquable dans la mesure de la circonférence terrestre.

### Dicéarque de Messine

Dicéarque fut un homme universel : philosophe, politologue, géographe, mathématicien, cartographe. Il procéda à une mesure de la circonférence terrestre en ayant noté qu'au zénith de Lysimachia (Thrace) culminait la tête de la constellation du Dragon et qu'au zénith de Syène (Assouan), supposé sur le même méridien que Lysimachia, culminait la tête de la constellation du Cancer. La différence de déclinaison entre ces deux étoiles est d'un quinzième de circonférence,  $24^\circ$ . Il en résulte que l'angle que font entre elles les verticales de Lysimachia et Syène, qui représente la différence de latitude entre les deux villes, vaut aussi  $1/15$  de circonférence.

Dicéarque a ensuite déterminé la distance entre les deux villes (mesures de distances terrestre en Egypte, en Asie Mineure, mesure de distances maritimes en Méditerranée en Mer Noire) soit 20 000 stades, ce qui correspond à une circonférence terrestre de :  $20\,000 \times 15 = 300\,000$  stades, soit 300 000  $\times$  0,185 185 = 55 555 km.

La mesure de Dicéarque donne au degré d'arc de la sphère terrestre  $300\,000/360 = 833$  stades  $1/3$ , soit 154,32 km au lieu de 111,12 km.

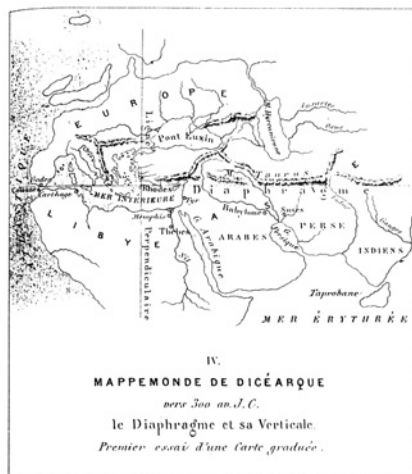
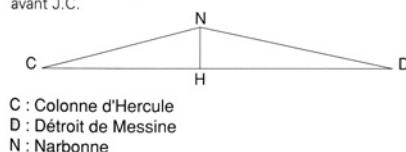


Figure 8.3 : Mappemonde de Dicéarque vers 300 ans avant J.C.



### La cartographie de Dicéarque

Dicéarque divisa l'oecumène en deux parties Nord et Sud au moyen d'un "parallèle" central, le diaphragme, qui passe par les Colonnes d'Hercule, le détroit de Messine, le Péloponnèse, Rhodes, qui longe la chaîne de Taurus et l'Indou Kouch. Au diaphragme était associée une ligne perpendiculaire passant par Rhodes et jouant le rôle de méridien central. Dicéarque étendait l'oecumène en latitude, de Méroë au cercle polaire arctique, sur la foi de Pythéas. Pour dresser sa carte, Dicéarque utilisa, outre les données de l'expédition d'Alexandre la documentation de l'anabase de Xénophon pour la Mer Noire, les reliefs de l'Arménie et du Kurdistan.

### Eratosthène (ca-280 à -190)

Eratosthène naquit à Cyrène vers 280 avant J.C. Après avoir séjourné à Athènes, il fut appelé à Alexandrie par Ptolémée Evergète (Ptolémée III) pour être le précepteur de son fils et pour lui confier la direction de la fameuse bibliothèque d'Alexandrie, où les Ptolémées avaient rassemblé jusqu'à 700 000 volumes. Eratosthène, qui dirigea cette bibliothèque jusqu'à 80 ans, a pu disposer d'une énorme documentation pour son œuvre : celle-ci fut d'abord historique, puisqu'on lui doit la fixation des dates des principaux événements

politiques et littéraires depuis la conquête de Troie, mais Eratosthène fut aussi géographe, cartographe, géomètre, astronome, philosophe et même littérateur.

### Eratosthène astronome

Dans le traité "De mensionibus" d'Eratosthène, cité par Macrobie, il est écrit que le diamètre de la Terre serait 27 fois plus faible que celui du soleil ( $r_s/r_t = 27$ ). Le rapport correct est  $r_s/r_t = 109$ . Par ailleurs, selon Plutarque, Eratosthène plaçait le soleil à 804 000 000 stades de la Terre. Avec le stade de 157,5 m de Tannery, cela donne :  $0,1575 \times 804\,000\,000 = 126\,620\,000$  km pour la distance du centre de la Terre à celui du soleil :  $R_s$ , au lieu de la valeur correcte de 150 000 000 km. Si on prend le rayon terrestre  $r_t = 6316,86$  km, on a :  $R_s/r_t = 126\,630\,000/6316,86 = 20\,046$ . D'après les mesures modernes ce rapport varie de 23 000 à 23 850 et on considère en général sa valeur moyenne 23 452. Le rapport  $R_s/r_t$  d'Eratosthène est celui qui se rapproche le plus du rapport moderne.

Eratosthène mesura également en 225 avant J.C. l'obliquité de l'écliptique, au moyen des distances zénithales au solstice d'été et au solstice d'hiver. La différence entre ces deux distances zénithales représente le double de l'obliquité de l'écliptique, qui ressort à  $23^\circ 51' 19,5''$ , arrondi à  $23^\circ 51' 20''$ . La vraie valeur de l'obliquité de l'écliptique était  $23^\circ 43' 23''$ . L'erreur d'Eratosthène n'était donc que de  $8'$ . Il calcula aussi la longueur de la circonférence, terrestre à partir de la mesure de l'arc de méridien entre Syène et Alexandrie, soit un cinquième de la circonférence auquel il affecta une longueur de 5 000 stades, soit 250 000 stades pour la circonférence terrestre, chiffre qu'il porta à 252 000 stades pour avoir un nombre divisible par 360, ce qui donne 700 stades par degré.

### Eratosthène géographe et cartographe

Le "Traité de Géographie" et la carte l'accompagnant ne sont connus que par les études et les critiques qu'en a fait Strabon. Eratosthène considérait l'oecumène comme une "île" entourée par un océan. L'oecumène avait une "largeur" ■■■



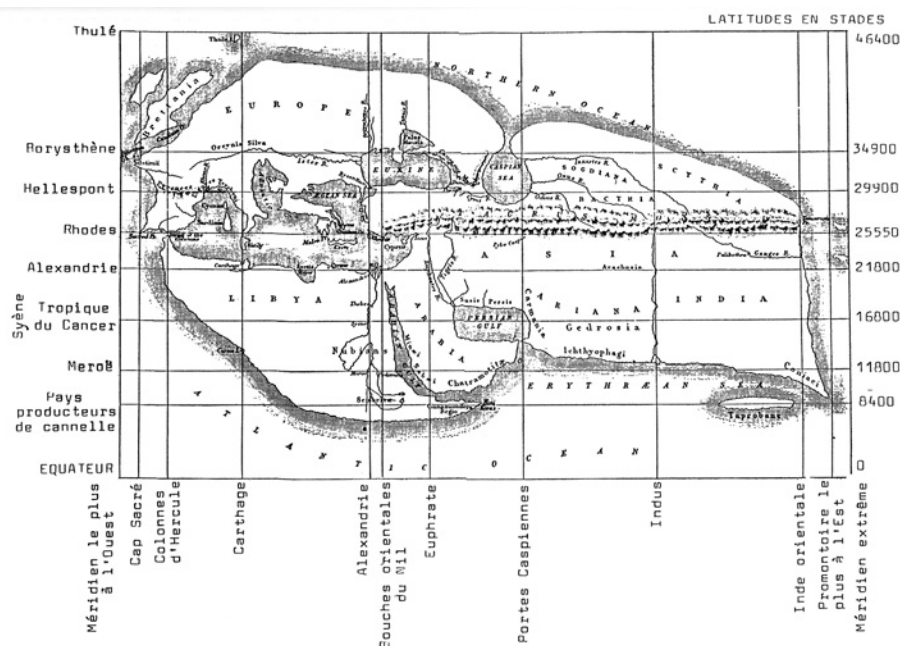


Figure 8.10 Reconstitution de la carte d'Eratosthène

■ ■ ■ de 38 000 stades et une "longueur" de 78 000 stades. Les méridiens et parallèles forment un réseau perpendiculaire. Le passage des stades aux degrés (à raison de 700 stades par degré) aurait été facile, mais Eratosthène continua à numéroter ses méridiens et parallèles en stades. L'emploi du degré sera généralisé plus tard par Hipparque, puis par Ptolémée. En ce qui concerne Thulé, Eratosthène se conforme à la relation de Pythéas qui affirme avoir atteint le cercle arctique ( $66^{\circ}$  N – 46 400 stades). Pour déterminer les longitudes, on utilisait les éclipses de lune. Ces mesures étaient rares et entachées d'incertitude (atteignant le tiers de la quantité à mesurer). Aussi Eratosthène utilisait-il les mesures des itinéraires, terrestres et maritime. Les longueurs estimées étaient conservées sur le parallèle de Rhodes. Des corrections étaient apportées pour tenir compte de l'inclinaison de la direction du segment vis à vis de celle du parallèle et pour compenser la non convergence des méridiens dans la projection d'Eratosthène. La différence de longitude donnée par Eratosthène entre les Colonnes d'Hercule et l'embouchure du Gange est de 68 000 stades, soit  $97^{\circ},14$  alors que la différence de longitude exacte est de  $95^{\circ},5$ . L'erreur est donc inférieure à  $2^{\circ}$  et cela malgré l'erreur de  $11^{\circ}$  entre Carthage et Arbelles. Il y avait donc d'heureuses compensations d'er-

reurs ! Malgré ses défauts, la carte d'Eratosthène, avec sa grille de méridiens et parallèles, constitue un progrès sensible par rapport à la carte de Dicéarque. Prenant en compte d'une part les mesures des bématises de l'expédition d'Alexandre le Grand, d'autre part les déterminations de Pythéas, la carte d'Eratosthène apparaissait pour l'époque comme une carte moderne, qui restera le fondement de la vision de l'oecumène durant presque 300 ans jusqu'à la carte de Marin de Tyr.

## ■ La géographie descriptive d'Eratosthène

Dans son traité de géographie Eratosthène donne la description des différentes régions : données physiques, ethnographiques, économiques. Pour l'Inde, par exemple, après avoir étudié les limites naturelles, il analyse le rôle essentiel des deux grands fleuves, l'Indus et le Gange pour la vie du pays ; il indique comment leurs inondations commandent la vie agricole, il dépeint la riche faune fluviale. Il décrit aussi les populations : les Ethiopiens à peau foncée, les Egyptiens à teint clair.

## ■ Conclusion sur Eratosthène

Eratosthène apparaît comme un véritable génie polyvalent en astronomie, géographie, cartographie.

- En astronomie, il lui revient le mérite d'avoir assigné à l'obliquité de l'écliptique la valeur  $23^{\circ}51'20''$ .
- Sa détermination de la longueur de la circonférence terrestre est la première relativement précise concernant la dimension de la Terre.
- Son canevas de méridiens et de parallèles, non équidistants, n'en constitue pas moins un progrès considérable par rapport aux cartes antérieures.
- Il accumula une énorme documentation, en corrigeant les informations antérieures.

## Timosthène (3<sup>e</sup> siècle avant J.C.)

Premier pilote ou amiral de Ptolémée Philadelphe, Timosthène est l'auteur d'un ouvrage "Sur les ports", en 10 livres, composés entre 270 et 240 avant J.C., sorte de routier avant la lettre, où étaient décrits tous les ports de la Méditerranée et de la Propontide (Mer de Marmara) et où étaient indiquées en stades les distances sur terre ou estimées en mer. L'ouvrage était accompagné d'une carte. L'ensemble fut très consulté par Eratosthène qui le couvre d'éloges. Quoique de précision assez faible, la carte, accompagnée de l'ouvrage, fut couramment utilisée par les marins grecs jusqu'à l'apparition de la carte de Marin de Tyr. Mais Timosthène est surtout célèbre par sa rose des vents, connue sous le nom de "rose grecque de Timosthène", à 12 directions espacées entre elles uniformément de  $30^{\circ}$ . ●

## Pour en savoir plus sur le sujet

Consultez l'ouvrage de M. Raymond D'Hollander "Sciences Géographiques dans l'Antiquité, Connaissance du Monde et Conception de l'Univers" en vente au prix de 49 € + 6,10 € de frais d'envoi à :  
L'AFT 2, avenue Pasteur  
94165 SAINT-MANDE CEDEX  
Tel : 01 43 98 84 80  
Fax : 01 43 74 72 80  
E mail : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org)

Frédéric Bretar, dans le cadre de son de DEA en Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, a écrit et soutenu en 2004 un mémoire traitant "l'histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda : Développements théoriques et mise en pratique. Application à la navigation". Ce document a paru particulièrement intéressant pour nos lecteurs férus d'histoire des sciences géographiques, et son auteur a bien voulu nous le présenter en trois publications successives, après "Des Longitudes et des Mers : la genèse de la navigation", voici la deuxième.

## Le temps des premières longitudes (2/3)

■ Frédéric BRETAR

*Ce début de XVII<sup>e</sup> siècle est une période charnière pour l'Homme, pour sa conception du Monde et pour la philosophie naturelle. La science des longitudes n'est pas en reste et les découvertes de Galilée seront à la base d'une esquisse de solution de ce délicat problème. La découverte des satellites de Jupiter va bouleverser la science des longitudes. Si cette horloge céleste est difficile à observer du pont d'un navire, elle résoudra pour un temps le problème de la détermination des longitudes à terre. Les satellites de Jupiter n'auront cessé d'être observés, leurs mouvements prédits au sein d'éphémérides dont les premiers furent ceux de D. Cassini en 1668. Cette seconde période s'achève aux abords du siècle des Lumières quand la cartographie se rationalise. Nous allons voir par contre que la navigation hauturière reste problématique. On reprend les idées de G. Frisius concernant les distances lunaires, on se penche sur le problème du magnétisme terrestre pendant que Huygens fabrique des machines à garder le temps.*

### Les cadences parfaites des planètes Médicéennes

Le problème des longitudes en mer va progressivement devenir aussi célèbre que celui de la quadrature du cercle. Dès la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, certains états proposent des récompenses<sup>1</sup> à quiconque y apporterait une solution ? Parmi les nombreux postulants, le plus célèbre fut sans doute Galilée. En 1636, il propose aux Etats Généraux des Provinces Unies de Hollande une méthode pour déterminer les longitudes en mer. Cette proposition est l'aboutissement des recherches de

Galilée en ce domaine. Le savant fonde sa méthode sur l'observation des occultations des lunes de Jupiter. C'est en effet dans la nuit du 7 janvier 1610 qu'il observe des choses que personne n'a jamais vues avant lui : les astres Médicéens, ou quatre des huit satellites de Jupiter<sup>2</sup>. Mais c'est seulement en 1612 qu'il notera pour la première fois une éclipse de ces satellites. Quand un satellite entre dans l'ombre de la planète, il disparaît pratiquement instantanément. Si un navigateur pouvait noter l'heure locale d'un tel événement et la comparer à celle à laquelle cet événement est sensé se produire au dessus d'un méridien de référence, la différence en temps donnerait directement la longitude du navire.

Comme Gemma Frisius un siècle plus tôt, la mise en pratique d'une telle méthode ne va pas de soi. D'abord, l'observation est particulièrement délicate (nous y reviendrons en détails), et malgré des solutions techniques avancées par son inventeur (un casque muni d'une lunette, le celatone), la qualité des optiques (télescopes) est trop faible. Puis, surtout, le calcul précis d'une longitude suppose la possession de tables astronomiques soigneusement établie. Au temps de Galilée, on ne les avait pas encore. Il faudra alors attendre les travaux de l'astronome Dominique Cassini (1625-1722) dont les éphémérides sont publiées en 1668. Ces tables<sup>3</sup> ont la précision nécessaire à l'emploi prévu par Galilée, emploi de grande importance pratique pour améliorer la cartographie terrestre. Pour leur rédaction, Cassini considère comme circulaires et uniformes les mouvements des satellites, mais applique des corrections empiriques issus de ses observations. Il calcule l'inclinaison de leurs orbites par rapport à celle de l'orbite de Jupiter sur l'écliptique, calcul qui lui permet de déterminer avec une bonne précision leurs latitudes par rapport à la planète.

1 L'Espagne avec Philippe II en 1567, puis Philippe III en 1598, puis la Hollande

2 Les durées de révolution de ces quatre satellites sont brève, 1 jour 18 heures pour le premier, 3 j 13h pour le second, 7j 3h pour le troisième et 16j 18h pour le dernier

3 Les éphémérides de Cassini ont de plus servi à Römer en 1676 pour mettre en évidence de la vitesse finie de la lumière

■ ■ ■ Outre la nécessité d'avoir des tables fiables, il est aussi capital de disposer d'un compteur de temps régulier. Si Galilée ne possédait qu'un simple pendule pour mesurer les périodes de ses satellites, les architectes de la nouvelle carte de France disposeront de vraies horloges, bâties en partie sur les recherches du physicien hollandais Christiaan Huygens (1629-1695). La détermination précise des heures locales via une horloge fiable pourrait constituer une avancée sans précédent dans notre rapport à l'espace.

## Le temps devient mesurable

Christiaan Huygens est un acteur incontournable dans la quête des longitudes, tant sur mer qu'à terre. Si pour Kant, le temps est une condition nécessaire de possibilité des phénomènes, pour Huygens, c'est une condition nécessaire à toute physique. Toute mesure s'inscrit dans le temps. C'est pourquoi le physicien hollandais s'attachera à des études aussi bien théoriques (isochronisme de la cycloïde) que pratique (les horloges) tout au long de sa vie. C'est lui qui reprendra l'idée de Gemma Frisius (cf. article précédent) de régler une horloge sur l'heure du méridien origine et de transporter ce temps sur un vaisseau. Il est habité, dès 1659, par la certitude de produire par art un temps plus exactement mesuré que celui dont la nature elle-même donne des exemples. Son enthousiasme est rapidement partagé et confirmé par les essais en mer de ses premières horloges. Dans une lettre de Huygens au Major Holmes revenant d'un voyage atlantique vers les îles de Saint Thomas et reproduite dans les *Philosophical Transactions* de 1667, il écrit :

*"I did not imagine that the watches of this first structure would succeed so well, and I had reserved my main hopes for the new ones. But seeing that those have already served so successfully, and that the others are get more just and exact, I have the more reason to believe that the invention of longitude will come to its perfection."*

C'est cette confiance dans le pouvoir de la mécanique qui le fait se pencher sans discontinuer de 1660 à sa mort en 1695, sur cet espace marin dont l'instabilité constitue le caractère essentiellement non mesurable longitudinalement. L'épisode du refus de la méthode astronomique proposée par Galilée en 1635 pour la détermination des longitudes par les membres du jury du concours ouvert par les Etats Généraux de Hollande est bien connue de Huygens lorsqu'il confie dans une lettre à Van Schooten le 12 janvier 1657, son espoir de vaincre par le moyen de la technique, le problème de longitudes.

*"J'ai trouvé ces derniers jours un nouveau modèle d'horloge qui mesure les temps avec tant de précision qu'il y a grand espoir que l'on puisse par son moyen trouver les longitudes surtout s'il suppose le transport en mer."*

Mais en 1657, Huygens est loin de maîtriser l'ensemble des obstacles qui s'opposent au transport d'un garde temps en mer, et le souhait qu'il formule ici montre que l'adaptation de gardes temps aux conditions des grands voyages océaniques n'est pas encore pensée comme un véritable problème. Cette nouvelle horloge, dont il donne une description dans l'*Horlogium* de 1658 consiste en l'adaptation d'un pendule dont les oscillations de faibles amplitudes sont inter-

ceptées par un mécanisme d'échappement à ancre. Il convient de noter que le problème de la détermination des longitudes est moins lié à la précision mathématique rigoureuse de l'oscillation qu'à la possibilité de maintenir, par un artefact, une oscillation pratiquement constante.

Après quelques essais en mer, Huygens s'attaque de front au problème de la houle, et en 1671, il propose un pendule triangulaire, immédiatement suivi de l'invention d'une suspension à cardan encore en usage plusieurs siècles après lui dans la suspension de chronomètres mécaniques. Au mouvement pendulaire, il substituera le ressort spiral qui arme les montres portatives. Bien que méfiant vis-à-vis de ce garde-temps, c'est cette invention (disputée par Hook) qui est à la base des chronomètres portatifs modernes :

*"La pendule était sans doute le moyen le plus facile et le plus certain pour connaître les longitudes en mer, si avec la perfection de l'égalité et de la justesse, elle n'eût point le défaut de n'être portable et de ne pas pouvoir être mue avec le corps auquel est attachée sans s'arrêter, en telle sorte que l'agitation des vaisseaux interrompt nécessairement son mouvement, qui est un inconvénient que l'on n'a pu éviter malgré toutes les précautions et tout l'art que l'on y a apporté jusqu'à présent."*

Huygens estime que le ressort a trop d'inconvénients pour la mesure du temps. Les tentatives qu'il réalise jusqu'en 1683, si elles n'aboutissent pas à la résolution définitive du problème de la longitude, et si elles n'aboutissent pas au remplacement pur et simple des vétustes horloges marines par la technique du ressort, contribue fortement à indiquer la voie de sa résolution. Cette invention est pour nous un des principaux acquis de la mesure du temps.

## Les longitudes entre terre et mer Splendeurs...

La méthode des Immersions/Emersions des satellites de Jupiter est simple dans son principe, mais fort complexe en pratique (même à terre). En effet, la connaissance de l'heure locale pouvait certes être précise, grâce aux nouvelles horloges, mais la régularité d'un jour à l'autre du pendule n'était pas pour autant assurée, loin de là. Bien que les tables de Cassini fussent suffisamment précises pour espérer trouver la longitude de points sur terre, l'observation d'une éclipse d'un satellite de Jupiter nécessitait de longues opérations de vérification des horloges afin de connaître leur marche exacte, leur avance ou leur retard. La première étape consistait à déterminer le midi local par la méthode de la méridienne, et d'initialiser les pendules. Le comportement des horloges était ensuite soigneusement inscrit dans un registre pendant plusieurs jours, permettant d'apprécier les corrections à effectuer lors de l'observation. Les instructions générales pour de telles observations ont été rédigées par D. Cassini lui-même<sup>4</sup>

*"Pour faciliter les observations astronomiques dans les voyages, avant que de partir on règlera les pendules à celles de l'observatoire et l'on marquera par un filet à plomb la situation dans laquelle il les faudra remettre. On marquera aussi la*

<sup>4</sup> "Voyage au Cap Verd en Afrique et aux îles de l'Amérique", in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1729, pp. 432-435



*situation du petit poids qui règle la vitesse de la pendule, pour pouvoir le remettre en cas qu'il se déplace. On observera combien de seconde par jour avance ou retarde la pendule en avançant ou en reculant le petit plomb au-dessus ou au-dessous à la différence d'un pouce. Ayant mis [les pendules] en mouvement à l'heure estimée, on prendra quelques hauteurs du bord supérieur ou inférieur du Soleil [...] avant et après midi. On compare l'heure du matin avec celle du soir et on aura l'heure du midi. [...] Après avoir trouvé l'heure du midi, si elle est éloignée du point de douze heure, on peut avancer ou reculer l'aiguille des minutes [...] On fera les mêmes opérations le suivant et par là on trouvera le temps que l'horloge marque à midi. [...] S'il s'en faut beaucoup que la pendule soit d'accord avec le ciel au bout de 24 heures, on saura combien il faudra baisser le petit poids du pendule par la différence qu'on aura observé qu'il fait par jour le baissant ou haussant d'un pouce. [...] après qu'elle sera réglée, on pourra commencer à s'en servir."*

Une fois les horloges "étalonnées" (on en prend généralement plusieurs), il s'agissait d'observer les satellites entrer et sortir du cône d'ombre de Jupiter.

Sur les quatre lunes pouvant servir au calcul de la longitude, on préfère souvent se baser sur la plus proche de Jupiter (période de révolution la moins longue). Notons enfin qu'il est plus facile de suivre un satellite et de noter l'heure de sa disparition, plutôt que de regarder dans la nuit sidérale et attendre qu'une vague lumière s'en dégage.

Cette méthode est maintenant en fait la seule permettant de trouver de manière précise et régulière la longitude du lieu



Extrait de la carte de déclinaison magnétique de Halley - 1702. Les lignes isogones apparaissent sur la surface de l'océan.

d'observation par rapport au méridien origine (celui de Paris). Bien que la mise en place soit délicate, une telle précision n'avait jusqu'à présent pu être atteinte que lors de l'observation d'éclipses de Lune (qui ne sont pas visibles de toute part). C'est une aubaine pour le renouveau de la cartographie. L'Académie des sciences, en 1666, se voit attribuer la mission d'une cartographie précise de la France, notamment sous l'impulsion de Colbert (1619-1683). Une triangulation générale de la France est décidée, entreprise par Picard (1620-1682), poursuivie par D. Cassini, puis son fils Jacques (1677-1756). À partir de la mesure de la base d'un premier triangle et de la connaissance des coordonnées géographiques d'un des sommets de cette base obtenues par des observations astronomiques, on peut construire une série de triangles et connaître leurs caractéristiques. À la fin de la série, un autre point astronomique est effectué permettant de contrôler les erreurs éventuelles et de calculer les dimensions réelles d'un arc de méridien ou de parallèle. Pour la première fois, on disposait d'une technique rigoureuse pour mesurer les dimensions de la Terre, pour établir sa forme définitive (aplatie aux pôles ou à l'équateur ?) que la célèbre expédition de Bouguer et La Condamine au Pérou illustrera dans des conditions difficiles.

La création de l'Observatoire de Paris (1667) en même temps que celle de l'Académie des sciences fait de la France un pays à la pointe du progrès scientifique. L'Académie invite de nombreux astronomes étrangers et les gratifie de pensions. On compte parmi eux Huygens de Leyden, Ole Römer de Copenhague et D. Cassini de Bologne. Ils travailleront aux côtés de Jean Picard, Adrien Auzout et Philippe de la Hire.

On constate un élan sans précédent pour la connaissance de la géographie précise de la terre en cette fin de XVII<sup>e</sup> siècle. Les astronomes français, une fois le méridien de l'Observatoire de Paris bien établi, décident de relier les observatoires des différents pays voisins. Picard part pour Uraniburd (1671-1672), Chazelles en Méditerranée (1693-1695), D. Cassini en Italie (1694-1696), J. Cassini en Flandre, Hollande et Angleterre (1697-1698). Des projets encore plus ambitieux et des voyages plus lointains sont préparés très rapidement. Richer à Cayenne (1671-1673), d'autres aux Antilles, à l'île de Fer.

## ...et misères des lunes de Jupiter

La méthode mise au point par Cassini semble porter ses fruits, à terre. Mais on s'aperçoit progressivement d'imperfections. D'abord, les horloges ne sont pas transportables en l'état et nécessitent un étalonnage avant chaque mesure, comme nous venons de le voir. Le roulis d'un navire empêche pratiquement cette étape, le balancement du pendule étant directement influencé par la houle. D'autre part, nous avons vu que définir précisément l'instant d'immersion (dans le meilleur des cas) était parfois difficile à apprécier et pouvait varier d'un observateur à un autre, pour une même immersion. Le type de lunette utilisée peut aussi avoir une importance primordiale. En effet, l'instant de disparition d'un satellite ne sera pas le même à travers une lunette de 34 pieds et à travers une lunette de 18 pieds. On verra les émergences plus tard de quelques instants par la seconde que par la première ! Si cette erreur est

■ ■ ■ négligeable dans le cas de longues bases, elle est extrêmement gênante lorsqu'il s'agit de bases plus courtes.

L'obstacle majeur à l'utilisation de cette méthode à bord d'un navire est l'encombrement de la lunette. Le fort grossissement et la faible ouverture des lunettes astronomiques de l'époque imposait un socle stable afin de ne pas perdre de vue la planète. C'est une chose impossible sur le pont d'un navire que la houle fait osciller en permanence. Il s'avère donc que malgré des tentatives d'amélioration de la stabilité de la lunette (chaise suspendue, le celatone de Galilée), il n'est pas possible d'appliquer l'observation de la régularité des mouvements des satellites de Jupiter à la détermination des longitudes en mer. Huit ans après la création de l'Académie des sciences, le roi d'Angleterre, Charles II, signe un décret instituant la Royal Society en 1674. Les astronomes anglais sont trop au courant de l'inapplicabilité de la méthode de Cassini pour trouver les longitudes en mer. C'est autour de l'astronome John Flamsteed (1646-1719) et de sa conviction que la méthode des distances lunaires est la seule à pouvoir solutionner les longitudes en mer que la Royal Society crée l'Observatoire de Greenwich en 1676. En effet, l'application de la méthode des distances lunaires, nous l'avons vu, nécessite la connaissance de deux données fondamentales :

- la position des étoiles fixes par rapport à la course annuelle du soleil (écliptique)
- la position de la Lune au dessus d'un méridien de référence au moment où un navigateur fait une observation.

D'après ses propres observations, Flamsteed a prouvé que le meilleur catalogue d'étoiles disponible à l'époque était celui produit par Tycho Brahe (1546-1601), avec une erreur de 10 minutes ou plus, tandis que les tables de la Lune fournissaient sa position à 20 degrés près, soit une erreur potentielle sur la position terrestre de plusieurs centaines de miles dans les latitudes équatoriales. Les données nécessaires à la fabrication d'un nouveau catalogue prendrait des années. C'est en effet une activité qui occupera les astronomes du monde entier pendant plus de 150 ans.

## Un bilan mitigé

Trouver les longitudes est au cœur des préoccupations des grands observatoires. On sait maintenant que la connaissance de la position des étoiles fixes avec précision est une des conditions nécessaires à toute entreprise astronomique de calcul des longitudes, ainsi que celle du mouvement de la Lune. On a vu que l'observation des éclipses de Lune furent pendant longtemps la seule méthode conduisant à la connaissance des longitudes *"et c'est en effet celle qui le présente le plus naturellement"*. Nous connaissons les limitations de cette méthode. Les principales éclipses continueront à être observées pour valider les coordonnées géographiques de certains lieux remarquables.

Parallèlement, un certain nombre de méthodes sont mises au point. Il s'agit par exemple de l'occultation des fixes pas la Lune, cas particulier des distances lunaires correspondant au moment de l'immersion de l'étoile par la Lune puis de sa réapparition de l'autre côté.

Pour le Soleil également, on peut observer le début où les disques solaire et lunaire sont tangents extérieurement. C'est le début ou la fin de l'éclipse de Soleil. Au moment des contacts, les centres des deux astres sont à une distance de l'autre égale à la somme de leur demi diamètre. C'est une méthode développée par J. Cassini, en prolongeant les travaux de son père concernant les éclipses de Soleil ainsi que les intuitions de Edmund Halley (1656-1742) lorsqu'il propose en 1683 :

*"If therefore you happen at sea to observe nicely the time of an occultation or close application of a star to the moon, and can find a correspondent observation, about the same mean anomaly and distance of the moon from the Sun, especially near the aforesaid period of 18 years and 11 days, you may without sensible error, from hence pronounce in what Meridian your ship is tables."*

Un des avantages majeurs de cette méthode par rapport à celle des satellites de Jupiter, aux dires de M. Cassini, réside dans la possibilité d'observer les fixes de première, deuxième et troisième grandeur avec une lunette de 2 pieds au lieu d'une lunette de 10, 12 pieds. Une telle méthode nécessite la connaissance précise du cours de la Lune, ce que l'astronomie ne peut encore fournir.

## La piste magnétique

La recherche de la longitude via des mesures magnétiques a une histoire propre, en général indépendante des autres méthodes de détermination des longitudes, mais mérite d'être signalée car c'est le premier phénomène auquel la recherche accorde une dimension planétaire.

Nous avons vu que la boussole était utilisée par les marins pour indiquer le nord. C'est un instrument parfait par sa grande simplicité ; il n'a qu'un petit défaut : il n'indique par réellement le nord et cette erreur n'est pas constante en fonction du lieu et varie dans le temps. En chaque lieu, il y a un angle entre la direction du Nord géographique et celle indiquée par la boussole. L'histoire de la découverte de cette déclinaison est longue, obscure et commence avec les remarques que fait Christophe Colomb dans son journal de bord le 3 septembre 1492. C'est cependant G. Mercator qui le premier aura l'idée de déterminer les longitudes en mesurant la déclinaison magnétique. Les lois régissant le champ magnétique terrestre ne sont pas connues à l'époque. Pourtant, un médecin londonien du XVI<sup>e</sup> siècle, Guilielmus Gilbertus, dans son traité *De Magnete* publiera des tables de la déclinaison, en supposant que la Terre est un aimant géant.

On parlait d'expérimentation planétaire, il en s'agit effectivement d'une. L'étude du champ magnétique de la Terre nécessite des données réparties sur l'ensemble du globe. On sait qu'il faut travailler à grande échelle. Dès les premières années de la Royal Society, on encourage les navigateurs à récolter des observations de déclinaison :

*"To observe declinaison and variations of the compass or needle from the Meridian exactly in as many places as they can and the same every several voyages."*

Ces observations, ainsi que celles relatives aux courants marins, aux vents, à la marche de pendules, à la profondeur de

l'eau, à la salinité, à la nature du sol, doivent être consignées dans un registre à remettre à la Royal Society dès le retour en Angleterre. Les résultats ainsi obtenus seront rassemblés par Halley qui entame lui-même un grand voyage pour effectuer des mesures au moyen d'une boussole semblable à celle de Stevin. Il publie en 1702 la première carte globale de la déclinaison magnétique, sur laquelle il relie les points de même valeurs et forme des lignes isogoniques. Ces lignes, selon Halley, pourraient être utilisées pour calculer les longitudes en mer. La solution proposée par l'astronome anglais consiste à couper l'isoligne magnétique correspondant à la valeur de la déclinaison trouvée à bord d'un navire avec une latitude observée par la hauteur d'un astre (on obtient un point). Cette méthode fait douter les meilleurs auteurs jusqu'au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle sans pour autant totalement l'exclure. Cassini le rappelle dans un article présenté en 1722 à l'Académie des sciences. On l'accepte faute d'avoir une méthode qui s'impose en pratique à toutes les autres: *"Il n'est pas encore à espérer beaucoup pour les longitudes du système de M. Halley sur la déclinaison de l'aiman. Tout y paraît jusqu'à présent dans un mouvement assez irrégulier, et selon des espèces de méridiens magnétiques assez bizarre. Mais peut-être tirera-t-on un jour pour les longitudes quelque méthode."*

Même Pierre Bouguer, trente et un ans plus tard (bien qu'il exprime clairement toutes les précautions à prendre avec cette méthode) ne rejette pas définitivement la mesure de la déclinaison magnétique comme le moyen de trouver sa distance au méridien origine: *"Messieurs Mountain et Dodson ont entrepris de faire pour 1744 ce que M. Halley avait fait pour 1700. [...] Ils se sont trouvés en état de tracer les lignes courbes magnétiques tout autour de la terre, ce que n'avait pas fait M. Halley. Il m'a paru qu'il n'y avait qu'à joindre ensemble ces deux systèmes [...] pour pouvoir en retirer tout l'avantage possible [...] afin de voir le changement que souffre la déclinaison de l'aiman et de pouvoir juger à peu près de son progrès pour les années suivantes. [...] En plusieurs endroits ces mêmes lignes ne s'écartent pas extrêmement de la direction du méridien, et elles n'ont pas sensiblement changé de place depuis 1700 jusqu'en 1744. C'est principalement dans ces endroits qu'on peut employer avec succès la variation de l'aiman pour découvrir la longitude."*

## Aspect de la navigation à l'aube du siècle des Lumières

Outre les bateaux d'émigrants, ce sont des navires chargés de marchandises qui sillonnent les mers du globe. Le XVII<sup>e</sup> siècle a vu s'établir un nombre de comptoirs important sur les rives des colonies de toutes les nations européennes (France, Angleterre, Hollande, Allemagne, Espagne, Portugal). La forme définitive de la traite négrière en France est mise au point à Nantes au cours de la décennie 1720-1730 où seront affrétés jusque trente navires en 1765. Le commerce maritime au long cours a lieu essentiellement entre les métropoles et leurs colonies. Le Portugal développe fortement ses importations. En 1699, 765 kilos d'or étaient arrivés à Lisbonne; ce chiffre passait à 9000 en 1714 et 25000 en 1720. À partir de cette date, la quantité d'or débarquée à Lisbonne dépasse chaque année

11 000 kg. Il faut y ajouter les diamants et autres pierres précieuses ou fines. En échange, le Portugal exporte au Brésil des produits fabriqués et des esclaves achetés en Afrique. Le commerce espagnol a subi une profonde crise de 1622 à 1650. Il remonte ensuite, surtout avec la mise en exploitation des mines d'argent du Mexique: l'argent du Mexique prend, au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, le relais de l'or brésilien.

Le commerce interlope (contrebande), est un des traits les plus caractéristiques du commerce transatlantique du XVIII<sup>e</sup> siècle. Il se fait en partie par l'intermédiaire du Honduras britannique et s'exerce surtout au détriment de l'Espagne par les anglais. Le déclin de la Compagnie des Indes Occidentale hollandaise font bientôt des anglais les maîtres du commerce atlantique. Le commerce avec les colonies anglaises d'Amérique du Nord s'est très vite développé, bien que les treize colonies aient été, avant tout, des colonies de peuplement. Ces colonies produisent en abondance des céréales, de la viande, du poisson, du bois, du tabac, du coton. Ces produits sont exportés en Angleterre, mais aussi dans les pays d'Europe méridionale qui envoient, en échange, du vin et des fruits en Grande-Bretagne. Au retour, les bâtiments anglais vont acheter des esclaves en Afrique et les transportent en Amérique. Le commerce est également actif entre les îles anglaises des Antilles, les colonies du continent, et la Grande-Bretagne. Les Antilles expédient du sucre, des mélasses, du rhum et reçoivent en contrepartie des produits alimentaires ou des objets manufacturés. Le siècle des Lumières est déjà bien entamé, la question des longitudes sur mer n'est toujours pas résolue. De toutes les méthodes proposées, aucune ne semble aboutie, bien que l'astronomie soit au service de la cartographie et de la navigation. En 1719, le père Louis Feuillée dans une lettre au Régent écrit:

*"Les avantages que la géographie et la navigation retirent des observations astronomiques m'engagent toujours plus vivement à exécuter les ordres de Son Altesse Royale. La navigation serait encore dans son enfance si l'astronomie ne l'avait perfectionnée, et le commerce de pays étrangers n'aurait pas apporté en Europe des sommes immenses si l'astronomie n'avait pas tracé aux navigateurs et posé sur les cartes les situations des lieux d'où l'on a tiré ces grande richesses. Les côtes de la mer du Sud étaient si mal jetées sur les meilleures cartes que leurs erreurs allaient à 160 lieues..."*

Si la navigation n'est plus dans son enfance, elle n'a pas pour autant atteint sa maturité. Les tables de la Lune ont une précision insuffisante, les positions des étoiles fixes ne sont pas encore connues, les instruments d'observation ne permettent pas de prendre les hauteurs des astres à moins de 5,6 ou 7 minutes, et enfin les horloges marines ne gardent pas la cadence, en général, plus de 24 heures. Il ne reste (toujours) au pilote guère que l'estime pour calculer sa longitude. En somme, cette période charnière d'entre deux siècles, ce couloir où l'impression que les horizons méthodologiques disparaissent, n'est en fait que le prélude aux grands développements théoriques et techniques du siècle des Lumières. Aux hésitations d'un Halley, s'ajoutent les prédictions d'un Cassini concernant le calcul des longitudes en mer où il écrit en 1722 que *"Tout dépendra de l'Art de perfectionner les Lunettes et il n'est pas encore épuisé."*

■■■



- ■ ■ Sans avoir tort, ce ne sera pas pour autant entièrement exact. C'est en effet sans compter la nouvelle conception des mouvements planétaires de Newton.

## Le Longitude Act

Certains événements ont marqué l'histoire des longitudes, la méthode d'Hipparque, les éphémérides de Cassini. D'autres, sans faire partie intégrante de cette histoire, ont pourtant grandement contribué à son évolution. Nous avons vu que les Anglais étaient très présents dans le commerce atlantique, et que la marine anglaise sillonnait allègrement cet océan. Même si ce n'est pas le seul, c'est sans doute un des plus fameux naufrages, celui d'une partie de la flotte de l'Amiral anglais Sir Clowdisley Shovel le 29 septembre 1707 sur les brisants des îles Scilly, au large de la pointe Ouest de l'Angleterre, emportant avec lui 2000 de ses hommes, qui fit prendre conscience aux autorités britanniques de l'urgence, et du sérieux de la situation concernant la pratique de la navigation en mer.

C'est ce qui a en partie motivé le Longitude Act signé par la Reine Anne le 8 juillet 1714 récompensant toute personne capable de fournir un moyen pratique pour calculer les longitudes en mer avec des conditions de précision impératives. Le gagnant recevrait 10 000 livres si l'erreur au cours d'un voyage vers les Indes occidentales (d'une période minimum de six semaines) ne dépassait pas 60 miles, il recevrait 15 000 livres si elle ne dépassait pas 30 miles, et 20 000 livres si l'erreur finale était inférieure à 30 miles. Le Longitude Act désigna un jury, le Board of Longitudes, constitué de savants, d'officiers de marine et de fonctionnaires du gouvernement. Parmi eux l'Astronome Royal (Flamsteed) y figurait comme membre d'office, ainsi que les professeurs de mathématiques des universités d'Oxford et de Cambridge et le président de la Royal Society (Newton). L'attrait d'une telle récompense a suscité de nombreuses vocations, mais les projets proposés n'ont pas été jugés suffisamment réalistes.

L'ambition de cette assemblée est a priori de ne privilégier aucune solution potentielle, pourvu qu'elle satisfasse aux conditions imposées de précision. En amont de l'Act, une commission d'experts dirigée par l'astronome royal Halley, et par le président de la Royal Society, Newton, avait rédigé un rapport sur la longitude (25 mai 1714)

*"One is, by a watch to keep time exactly: but by reason of the motion of a ship, the variation of heat and cold and dry, and the difference of gravity in different latitudes, such a watch hath not yet been made. Another is, by eclipses of Jupiter's satellites: but by reason of the length of telescopes, requisite to observe them, and the motion of a ship at sea, those eclipses cannot be there observed. A third is, by the place of the moon: but her theory is not yet exact enough for this purpose: it is exact enough to determine her longitude within two or three degrees, but not within a degree....in the three ways there must be a watch regulated by a spring, and rectified every visible sunrise and sunset, to tell the hour of the day... in the first day, there must be two watches, this and the other mentioned above."*

Dans ce rapport, c'est au nom de la Royal Society que s'exprime Newton. Celui-ci énumère un certain nombre de possi-

bilités en vue de déterminer la longitude en mer *"vraies en théorie mais difficile à exécuter"* : par le biais d'une montre capable de garder le temps exactement, par celui des éclipses de Jupiter, ou par la position de la Lune. Décisif dans ce texte est le fait que les méthodes présentées, qu'elles mettent en jeu l'observation et le calcul astronomique ou bien l'élaboration de nouvelles machines, soient exposées sans jugement quant à leur faisabilité. Les savoirs auxquels elles font appel sont de nature différente. La première proposition suppose la construction d'une horloge inédite et relève essentiellement du domaine de l'atelier ; la seconde et la troisième nécessitent un dispositif d'observation adapté au déplacement nautique, mais surtout l'intermédiaire d'une discipline déjà mathématisée, l'astronomie, pour prévoir les mouvements des corps envisagés. Il n'y pas de hiérarchie dans cette énumération : les trois procédés sont, dans le texte de Newton, traités de la même manière sur le plan rhétorique. On voit cependant se profiler deux espaces privilégiés dans lesquelles se trouvent les solutions : la terre (l'atelier), et les cieux (les observatoires astronomiques). Les deux branches de la résolution du problème vont cependant bientôt se faire face dans une sévère concurrence opposant le côté artisanal de la construction de nouvelles machines d'une part, et le côté savant de l'observation et du calcul mécanique de l'autre. ●

## Contact

**Frédéric BRETAR**

Institut Géographique National

Laboratoire MATIS

Mail: Frederic.Bretar@ign.fr

## Bibliographie

**Bretar, F.** *Histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda : Développements théoriques et mise en pratique. Application à la navigation.* Mémoire de DEA Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, 2004.

## ABSTRACT

*The beginning of this 17th century is a hinge period for Man, for its idea of the World and for the natural philosophy. The science of longitudes is not in rest and discoveries of Galileo will be the basis of a sketch of solution of this delicate problem. The discovery of Jupiter satellites is going to upset the science of longitudes. If this celestial clock is difficult to observe from a ship deck, it will solve for a time the problem of the determination of longitudes on land. Satellites of Jupiter will not cease to be observed, their movements predicted within éphémérides whose firsts were these of D. Cassini in 1668. This second period ends up at the dawn of the 18th century when the cartography rationalizes. Deep sea navigation remains problematical. One resumes ideas of G. Frisius concerning lunar distances, one leans on the problem of the terrestrial magnetism while Huygens manufactures machines to keep the time.*

# A Madagascar ce ne sont pas les Dieux qui tombent sur la tête... mais les géomètres !

■ Henri de SAINT-SERNIN

*L'autre équipe ESGT restée sur Votovorona (en périphérie de la capitale de Madagascar) est venue se fondre avec les étudiants de L'E.S.P.A. (Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo) et ceci au plus grand bonheur de chacun. Effectivement, à travers un enseignement de travaux pratiques et de logiciels informatiques, les étudiants français devenus pour l'occasion professeurs, ont tissé de véritables liens affectifs et durables avec leurs homologues étudiants malgaches.*

**E**n accord avec l'administration de l'E.S.P.A. nous avons aménagé des séances de travaux pratiques pendant lesquelles nous avons utilisé les appareils que nous avons apportés. Tous les élèves sans exception ont découvert une part de leur métier. Cette situation quelque peu alarmante est encore due au manque cruel de moyens financiers. Notre venue leur a permis de laisser de côté la planchette et l'alidade et de se rendre sur le terrain avec entre les mains une station totale de type Leica TC1010. Pour la première fois, ils ont eu l'occasion de traiter leurs données sur informatique par une formation sur le logiciel de dessin COVADIS. Ces approches pratiques de leur futur métier ont rencontré un réel succès auprès des étudiants qui ont fait preuve d'une forte motivation.

Parallèlement les étudiants français ont pu prendre conscience que la seule dimension matérielle ne remplit pas l'existence au travers des liens très forts qui unissent les Malgaches à leurs ancêtres et à la nature : l'interprétation des moindres événements du quotidien par le rêve, le sacrifice et la possession assure un dialogue entre les défunts et leurs descendants.

L'implantation d'un point sur le sommet d'une des collines voisines du campus fut l'occasion de cette découverte au travers du rituel pour l'implantation d'une borne géodésique : cette colline était sacrée et l'emplacement qui convenait à la borne était situé au-dessus d'un tombeau. L'esprit des ancêtres était présent et il nous a donc fallu demander l'autorisation au Sage et au

chef du village pour l'implantation de cette borne. Aidés du responsable du campus pour les traductions, il a fallu expliquer notre projet et son utilité, à savoir que la borne servirait à la construction des routes, des ponts,... et à la délimitation du foncier. Il en est résulté que l'on devait procéder au sacrifice d'un coq. Comme nous étions étudiants, et par conséquent peu fortunés, le Sage a accepté que ce ne soit qu'un coq et non un bœuf qui soit sacrifié, et c'est pourquoi cela a dû se faire dans la plus grande discrétion (le sacrifice étant "petit"). L'achat du coq, de l'eau de Cologne indispensable à la cérémonie et le trajet jusqu'en haut de la colline s'est fait en secret.

Le rituel commence. Depuis trois endroits différents du sommet de la colline, face au vide, le Sage fait des incantations à l'intention des ancêtres et de Zanahary. Il rend ensuite hommage aux défunts devant des sortes de pierres tombales. Le vieil homme se met à prier, les paumes tournées vers le ciel et les pieds frappant le sol : *"sagesse des ancêtres, bénissez ces hommes ainsi que leurs compagnons et leur famille, car ils ne viennent pas souiller vos tombeaux mais ils viennent nous aider"*. Le coq est sacrifié, son sang recueilli dans un gobelet. A l'aide d'une de ses plumes, le Sage asperge tous les participants à la cérémonie d'eau de Cologne. Il verse ensuite dans le flacon un peu de terre, en précisant que si l'un de nous tombe malade ou s'il est malheureux, il suffit de lui mettre un peu d'eau de Cologne sur le front pour qu'il aille mieux. Le sang du coq est dispersé



sur les pierres tombales et les piquets que nous avons plantés à l'emplacement choisi pour la borne. Voilà, maintenant nous pouvons planter notre borne en toute tranquillité ; les esprits des ancêtres l'ont acceptée et les villageois ne l'arracheront pas.

Surprenante et jolie découverte pour nos élèves ingénieurs dont l'esprit cartésien est peut-être trop formaté par les dieux sinus et cosinus... elle a le mérite de rappeler que l'homme doit rester au centre de toute notre attention avec ses préoccupations tant physiques qu'immatérielles, intellectuelles, sentimentales ou spirituelles ; c'est un peu la leçon que la pratique des travaux fonciers, issus du droit coutumier par le biais des usages locaux, laisse aux géomètres-experts. Quelques semaines de partage du quotidien de nos nouveaux amis malgaches avec notre technique commune pour fil conducteur et l'aide de nos sponsors de 2004 Leica et Géomedia, nous donne envie d'œuvrer en commun dans les années à venir, de promouvoir ensemble les métiers de la topographie et du foncier et, pourquoi pas, de participer au développement de ce magnifique pays : *Mita be tsy lanin'ny mamba* Quand on est nombreux pour traverser la rivière, on n'est pas dévoré par les caïmans. ●



# Bernard Delagrange :

■ Jean-Pierre MAILLARD

**D**ans la mémoire de nombreux topographes bien vivace est le souvenir de la reconstitution historique des mesures de la méridienne organisée à l'occasion du passage à l'an 2000. Elle s'inscrivait dans les manifestations programmées, notamment le pique-nique géant proposé le 14 juillet de cette année là tout au long du méridien de Paris de Dunkerque au mont Canigou. L'AFT a largement pris sa part dans cette animation proposée au droit du milieu de la partie française du méridien.

On se rappelle notamment l'inauguration du signal géodésique du Peu de Ripolle fabriqué à l'ancienne sur la commune de Vesdun qui s'affiche comme le vrai centre de la France. Sa matérialisation est d'ailleurs figurée par un témoin fiché au cœur d'une carte de la nation réalisée en céramique sur plus de 10 m<sup>2</sup>.

L'esprit absorbé par l'Histoire on a sans doute moins remarqué dans la sous-préfecture voisine, au carrefour de l'Abattoir à Saint-Amand-Montrond, une sculpture dépouillée baptisée "Sphère éclatée" d'une facture résolument contemporaine.

## Sphère éclatée

Au centre d'un rond-point engazonné en forme de calotte, l'œuvre est posée sur un socle cylindrique réalisé en pavés de grès de petite taille. Sa forme parfaitement sphérique est divisée en quatre quartiers égaux écartés les uns des autres par deux espaces croisés respectivement orientés Est-Ouest, Nord-Sud. L'ensemble attire le regard par la beauté de la patine vert-de-gris du cuivre des enveloppes extérieures et l'inclinaison volontaire des quartiers de la boule vers l'Ouest. Faut-il que la sculpture soit forte pour être remarquable malgré sa simplicité et, somme toute une dimension modeste puis-



qu'elle ne mesure pas plus de 2 m de hauteur. L'inclinaison procède de l'intuition artistique de l'artiste et non pas d'une équation particulière. Le juste comme il faut est d'autant plus étonnant que le sculpteur a dû se soumettre à plusieurs contraintes.

La réalisation étant implantée dans l'emprise d'une voie publique, la taille limitée du volume a été imposée par le respect des règles de sécurité routière. En effet, les conducteurs qui abordent la patte d'oie ne doivent pas avoir une visibilité trop occultée par la sphère. De même la vue des automobilistes n'a

pas à être brouillée par la réverbération d'une quelconque lumière sur l'inox de la tranche des secteurs. Aussi leur partie plane a subi un traitement adapté pour supprimer la perception d'éventuels flashes provenant autant du soleil que des phares des voitures, d'où qu'on vienne.

La terre du giratoire, bombée car voulue comme une réplique de la sphère, doit supporter l'existence de trois panneaux directionnels ronds, flèche blanche sur fond bleu, qui enlaidissent la composition. Il est heureux que toute la signalisation routière, dont l'esthé-

Photos : © Jean-Pierre Maillard



# les éclats de la sphère

tique n'est pas la fonction première, soit assimilée par le plus grand nombre comme partie intégrante du paysage. Si tel n'était pas le cas, elle serait perçue comme une réelle pollution visuelle, ce qu'elle est, quand bien même sa nécessité.

Bernard Delagrance a du également renoncer à habiller la "Sphère éclatée" d'un chapelet de nuages aux formes alanguies prévu sur la maquette-projet

et ce pour satisfaire le maître d'ouvrage qui a souhaité une expression minimaliste pour le lieu d'implantation choisi. L'œuvre a été commandée par la ville de Saint-Amand-Montrond qui réserve à la sculpture une part notable de son action culturelle, la cité présentant dans son espace public une collection déjà riche de plusieurs dizaines de pièces.

Celle de Bernard Delagrance, inaugurée le 29 juin 1996, a fait l'objet d'un

mécénat de la Compagnie générale des eaux et de la société Brossette, fournisseur national de métaux. Comme on voit, une production plastique peut s'inscrire dans une succession de contraintes qui ne la rendent pas moins intéressante. Au contraire le talent du créateur est d'autant plus révélé quand le compromis est bon ce qui a par ailleurs l'avantage de permettre à chacun des acteurs de s'identifier quelque peu au résultat. ●



Photos : © Bernard Delagrance

## Bernard Delagrance

L'artiste est né à Paris en 1935. Il a suivi une formation de chaudronnier qui l'a conduit à travailler dans l'aéronautique et devenir un ouvrier professionnel très qualifié. Après une dizaine d'années d'activité sans bouger de Bourges et sa région, il a voulu s'évader de sa condition et sortir de l'entreprise. Ses études reprises dans les domaines littéraire et beaux-arts l'ont ensuite amené en qualité de directeur à vivre l'aventure des maisons de jeunes et de la culture (MJC) initiée par André Malraux.

Le plaisir du marteau, du travail du métal qui confine parfois à l'alchimie et celui de la dinanderie dans sa dimension objet d'art ne l'ont jamais quitté. Dès 1964 il se fait connaître comme sculpteur et, depuis, il n'a jamais cessé d'exposer en France et à l'étranger. A partir de 1974 il honore de nombreuses commandes publiques et privées principalement dans la région Centre à laquelle il est très attaché.

Il garde de sa formation d'origine l'utilisation de la géométrie si utile au traçage des tôles planes qu'il formera convexe ou concave dans la recherche de l'équilibre de ses créations abstraites. Ses bas reliefs qui habillent les murs de nombreux

équipements scolaires de la région Centre illustrent bien son mode d'expression qui s'apparente à l'écriture.

Sa production est donc rarement aussi géométrique que sa "Sphère éclatée". Quoiqu'il en soit, l'œuvre de Bernard Delagrance est pleine de légèreté et peut aussi être reçue comme la manifestation d'une musique intérieure animant des volumes qui semblent toujours en mouvement.

En jouant sur la lumière et l'ombre, le poli et le rugueux, le brillant et le mat, il privilégie avant tout le travail de la main plutôt que le concept intellectuel. Il met également son savoir-faire au service de la dinanderie et de ce point de vue a conservé de son premier métier le meilleur de l'ouvrier. C'est tout à son honneur d'être en même temps un créateur reconnu en restant en même temps un artisan hors pair.

Plein d'exigence et de rigueur, Bernard Delagrance résume l'essence de ses travaux avec la réflexion suivante : *"Tout y est forme arrondie qui se courbe et réchauffe par la pensée intérieure traversée de vibrations et de fulgurantes colorations..."*